

Universidade Federal de Juiz de Fora
Faculdade de Engenharia
Curso de Engenharia Elétrica - Energia

Felipe Ismael Gomes da Silva

**TÉCNICAS DE SINCRONIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE
ENERGIA RENOVÁVEIS COM A REDE ELÉTRICA**

Juiz de Fora

2016

Felipe Ismael Gomes da Silva

**TÉCNICAS DE SINCRONIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE
ENERGIA RENOVÁVEIS COM A REDE ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso (TCC), apresentado a Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Orientador: Pedro Machado de Almeida, Dr. Eng.

Juiz de Fora

2016

Ficha catalográfica elaborada através do Modelo Latex do CDC da UFJF
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Gomes da Silva, Felipe Ismael.

TÉCNICAS DE SINCRONIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO
DE ENERGIA RENOVÁVEIS COM A REDE ELÉTRICA / Felipe Ismael
Gomes da Silva. – 2016.

56 f. : il.

Orientador: Pedro Machado de Almeida, Dr. Eng.

Trabalho de conclusão de Curso – Universidade Federal de Juiz de Fora,
Faculdade de Engenharia. Curso de Engenharia Elétrica - Energia, 2016.

1. Geradores renováveis. 2. Conversores de sincronismo. 3. Filtragem. I.
Almeida, Pedro Machado de, orient. II. Título.

Felipe Ismael Gomes da Silva

**TÉCNICAS DE SINCRONIZAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE
ENERGIA RENOVÁVEIS COM A REDE ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso (TCC), apresentado a Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Aprovada em 21 de dezembro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Pedro Machado de Almeida, Dr. Eng. -
Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde, força e dedicação para superar as dificuldades até aqui enfrentadas.

A minha família, em especial minha amada mãe Mary Gomes da Silva e meus irmãos Rodrigo Santos Pereira, Renata Carvalho Pereira e Carlos Samuel Gomes de Araújo que sempre me apoiaram para que esta fase fosse completada com sucesso.

Ao meu professor orientador Pedro Machado de Almeida, pela dedicação, determinação e principalmente por seu compromisso com meu aprendizado na elaboração deste trabalho.

Aos grandes amigos que fiz, por conversas técnicas e momentos de descontração.

Ao Laboratório de Sistemas de Potência (LABSPOT), pela a estrutura que necessitei para formação.

A Universidade Federal de Juiz de Fora, pela a excelência no ensino.

A todos que diretamente ou indiretamente auxiliaram para a realização deste trabalho.

"Ora, se a nossa esperança em Cristo se restringe apenas a esta vida, somos os mais miseráveis de todos os seres humanos."

1 Coríntios 15:19.

Bíblia Sagrada.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia para sincronização de geradores de fontes renováveis, como por exemplo, geradores solares e geradores eólicos, com a rede elétrica. Esses conversores de sincronismo podem ser monofásicos ou trifásicos. A técnica de sincronização abordada é a aplicação do circuito *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* (SRF-PLL). Essa técnica consiste no rastreamento do ângulo de fase de uma determinada onda de tensão ou corrente de um sistema elétrico utilizando o conceito de transformação de coordenadas conhecidas como transformada dq .

Sabemos que o sistema elétrico de potência muitas vezes apresenta irregularidades como harmônicos e desequilíbrio entre fases, o circuito SRF-PLL apresenta, sob estas condições, oscilações, o que não é desejável, então, se faz necessário a utilização de uma estrutura que consiga contornar este problema. Este trabalho apresenta a utilização do Integrador Generalizado de Segunda Ordem, do inglês, *Second Order Generalized Integrator* (SOGI). O resultado de sua aplicação é a obtenção da componente de sequência positiva da componente fundamental de um determinado sinal. Essa técnica consiste na filtragem de um sinal de tensão ou corrente transformando-os em sinais de quadratura. Estes novos sinais de quadratura obtidos são agora submetidos a um componente chamado detector de sequência positiva e negativa. Após a obtenção, a sequência positiva do sinal passa pelo circuito SRF-PLL rastreando assim o ângulo de fase desejado.

Palavras-chaves: Geradores de fontes renováveis, sincronizadores de rede, transformada em quadratura dq , SRF-PLL, filtragem de sinal, SOGI.

ABSTRACT

This work aims to present a methodology for synchronization of renewable generators, such as solar generators and wind generators into the power grid. These sync converters can be single-phase or three-phase. The synchronization technique is an application of circuit *Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop* (SRF-PLL). This technique consists in tracking the phase angle of a given wave voltage or current in an electrical system using the concept of coordinate transformation known as transformed dq .

We know that the electric power system often presents irregularities, such as harmonics and imbalance between phases, the SRF-PLL circuit has, under these conditions, oscillations, which is not desirable, thus, it is necessary to use a structure to solve this problem. This work presents the *Second Order Generalized Integrator* (SOGI). The result of your application is to obtain the positive sequence component of the fundamental component of a given signal. This technique consists in filtering a voltage or current signal turning them into quadrature signals. These new quadrature signals obtained are now subjected to a component used to called positive and negative sequence detector. After getting the positive sequence, this result will pass through the SRF-PLL circuit for tracking the desired phase angle.

Key-words: Generators of renewable sources, network synchronizers, transformed quadrature dq , SRF-PLL, Signal filtering, SOGI.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Geração de energia elétrica a partir das fontes primária solar e eólica no Brasil.	13
Figura 2 – Célula fotoelétrica.	14
Figura 3 – Geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica.	15
Figura 4 – Crescimento da geração de elétrica por fonte solar fotovoltaica no Brasil.	16
Figura 5 – Evolução de capacidade instalada e energia solar gerada.	17
Figura 6 – Vazão mássica incidente no rotor.	18
Figura 7 – Aproveitamento teórico de energia eólica.	19
Figura 8 – Geração de energia elétrica por fonte eólica no mundo.	20
Figura 9 – Geração elétrica por fonte eólica no Brasil.	21
Figura 10 – Evolução da geração de energia no Brasil.	22
Figura 11 – Diagrama esquemático do fluxo de potência entre geração e carga.	26
Figura 12 – Estrutura básica do PLL.	27
Figura 13 – Diagrama de blocos do PLL.	28
Figura 14 – Diagrama de Blocos linearizado do PLL.	29
Figura 15 – Decomposição de um sistema trifásico em um sistema de referência $\alpha\beta$	31
Figura 16 – Decomposição de um sistema trifásico em sistema de referência $\alpha\beta$ e dq	33
Figura 17 – Circuito de filtragem baseado no SOGI.	34
Figura 18 – Estrutura de Filtragem de sinal monofásico.	35
Figura 19 – Circuito SRF-PLL.	37
Figura 20 – Filtragem de sinal trifásico.	38
Figura 21 – Esquemático da obtenção das componentes de sequência.	39
Figura 22 – Circuito DSOGI-PLL.	40
Figura 23 – Método de Euler regressivo.	41
Figura 24 – Estimacão do ângulo de uma rede monofásica.	42
Figura 25 – Resultados obtidos para $\omega_c = 300 \text{ rad/s}$	43
Figura 26 – Resultados obtidos para $\omega_c = 377 \text{ rad/s}$	43
Figura 27 – Resultados obtidos para $k_p = 1$ e $\omega_c = 377 \text{ rad/s}$	44
Figura 28 – Filtragem de Sinal através do SOGI.	45
Figura 29 – Estrutura digital do circuito da Figura 28.	45
Figura 30 – Resultados obtidos para $K = 0.5$	45
Figura 31 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$	46
Figura 32 – Resultados obtidos para $K = 3$	46
Figura 33 – Detecção de ângulo de operação de rede trifásica.	47
Figura 34 – Estrutura digital do circuito da Figura 33.	47
Figura 35 – Resultados obtidos para implementação do SRF-PLL em rede trifásica equilibrada.	48
Figura 36 – Detecção de ângulo de operação de rede trifásica com harmônicos.	49

Figura 37 – Estrutura digital da Figura 36.	49
Figura 38 – Resultados obtidos para $K = 0.5$	50
Figura 39 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$	50
Figura 40 – Resultados obtidos para $K = 3$	51
Figura 41 – Resultados obtidos para $K = 0.5$	52
Figura 42 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$	52
Figura 43 – Resultados obtidos para $K = 3$	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada dos componentes de geração elétrica no Brasil em dezembro de 2014.	22
Tabela 2 – Capacidade instalada estimada dos componentes de geração elétrica no Brasil em dezembro de 2024.	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora.
IRENA	Agência Internacional para as Energias Renováveis.
SEP	Sistema Elétrico de Potência.
ABNEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.
MME	Ministério Minas Energia.
EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
SIN	Sistema Interligado Nacional.
GWEC	Global Wind Energy.
GD	Geração Distribuída.
CI	Circuito Integrado.
CA	Corrente Alternada.
CC	Corrente Contínua.
PLL	Phase-Locked Loop.
VCO	Voltage Controlled Oscillator.
PI	Proporcional Integrador.
SOGI	Second Order Generate Integrator.
PD	Phase Detector.
LF	Loop Filter.
VCO	Voltage Controlled Oscillator.
EPLL	Enhanced Phase-Locked Loop.
BPF	Band-Pass Filter.
SRF-PLL	Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop.

SUMÁRIO

	LISTA DE ILUSTRAÇÕES	7
	LISTA DE TABELAS	9
	SUMÁRIO	11
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Geração Solar Fotovoltaica	14
1.1.1	Efeito Fotoelétrico	14
1.1.2	Panorama Mundial	15
1.1.3	Panorama Nacional	15
1.2	Geração Eólica	17
1.2.1	Aproveitamento Energético	17
1.2.2	Panorama Mundial	20
1.2.3	Panorama Nacional	21
1.3	Identificação do Problema	23
1.4	Motivação e Objetivos	24
1.5	Estrutura da Monografia	24
2	CIRCUITO DE SINCRONISMO MONOFÁSICO	26
2.1	Fluxo de Potência	26
2.2	Circuito de Sincronismo	27
2.2.1	Estrutura básica	27
2.2.2	Modelagem matemática do PLL	28
2.3	Sistemas trifásicos	30
2.3.1	A transformada de Clarke	30
2.3.2	A transformada de Park	32
2.4	Filtragem de Sinal através do Integrador Generalizado de Segunda Ordem	33
3	CIRCUITO DE SINCRONISMO TRIFÁSICO	36
3.1	Transformada de Park	36
3.2	Circuito SRF-PLL	37
3.3	Detecção de componentes de sequência em sinais desbalanceados e sob presença de harmônicos utilizando DSOGI-PLL	38
3.3.1	Filtragem de sinal	38
3.3.2	Detecção das componentes de sequência	39

3.4	Implementação digital	40
3.4.1	Método de Euler Regressivo	40
4	EXECUÇÃO E RESULTADOS	42
4.1	Considerações primárias	42
4.2	Sistemas Monofásicos	42
4.2.1	Monofásicos sem presença de harmônicos	42
4.2.2	Monofásicos com presença de harmônicos	44
4.3	Sistemas trifásicos	47
4.3.1	Sistemas trifásicos sem presença de harmônicos	47
4.3.2	Sistemas trifásicos com presença de harmônicos	48
4.3.3	Sistemas trifásicos desbalanceados com presença de harmônicos	51
5	CONCLUSÃO	54
5.1	Considerações gerais	54
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	54
	REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A medida que o tempo passa grandes mudanças ocorrem no mundo e em função disto todas as áreas, sejam elas sociais, econômicas, energéticas, ambientais, apresentarão grandes desafios. Tal constatação é observada na evolução tecnológica dos últimos 30 anos. Com o crescimento mundial, inevitavelmente também cresce a demanda por energia, e planejar esse crescimento de forma sustentável têm sido hoje o precursor do desenvolvimento de tecnologias de geração de energia por fontes renováveis tais como eólica e solar.

A Agência Nacional de Energias Renováveis (IRENA), divulga todo ano um estudo global sobre o atual cenário das energias renováveis no mundo, sendo possível a extração individual de dados por regiões e países. Sabe-se que predominantemente no Brasil a geração de energia elétrica é realizada através de usinas hidrelétricas, entretanto esse domínio têm diminuído com o passar dos anos. Segundo [1], entre os anos 2005 e 2014 o país apresentou um crescimento expressivo, de 93 GWh para 12.210 GWh de geração energia elétrica através de fontes eólicas e solares.

A Figura 1 a seguir ilustra este crescimento.

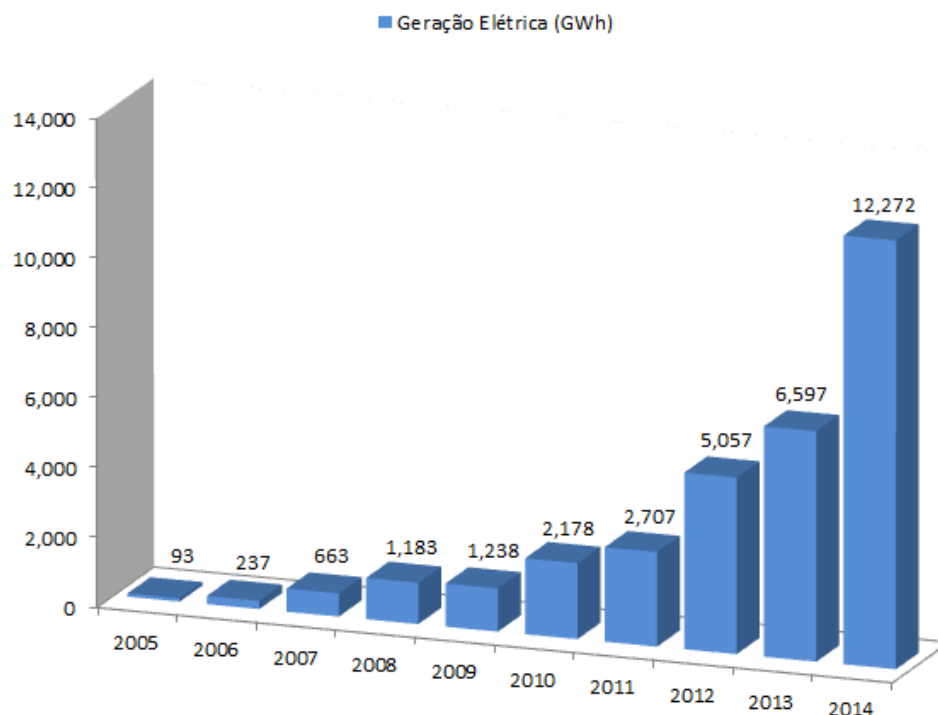


Figura 1 – Geração de energia elétrica a partir das fontes primária solar e eólica no Brasil.

Esse crescimento não se dá só pelo aumento da demanda energética, mas também pela a dificuldade de se encontrar áreas para a implantação de novas usinas hidrelétricas, visto que essas usinas provocam grandes impactos sócio-ambientais associados principal-

mente a inundação de área e realocação de pessoas. Esses fatores fazem de fato com que o custo de se construir novas hidrelétricas sejam bastante elevado [2].

Com todos esses fatores a inserção de geração por fontes eólicas e solares têm se tornado cada vez mais comum no setor, mudando assim os conceitos de operação tradicionalmente conhecidos do nosso sistema elétrico de potência (SEP).

1.1 Geração Solar Fotovoltaica

1.1.1 Efeito Fotoelétrico

A conversão energia advinda da radiação solar em energia elétrica ocorre devido ao efeito conhecido como fotoelétrico, observado pelo físico francês Alexandre-Edmond Becquerel em 1839. O efeito fotovoltaico consiste na liberação elétrons do material que é exposto à radiação eletromagnética, criando uma tensão ou corrente correspondente. O efeito fotovoltaico ocorre em materiais semicondutores como o silício (Si) [3].

Na Figura 2 é ilustrado de forma simplificada o efeito fotovoltaico.

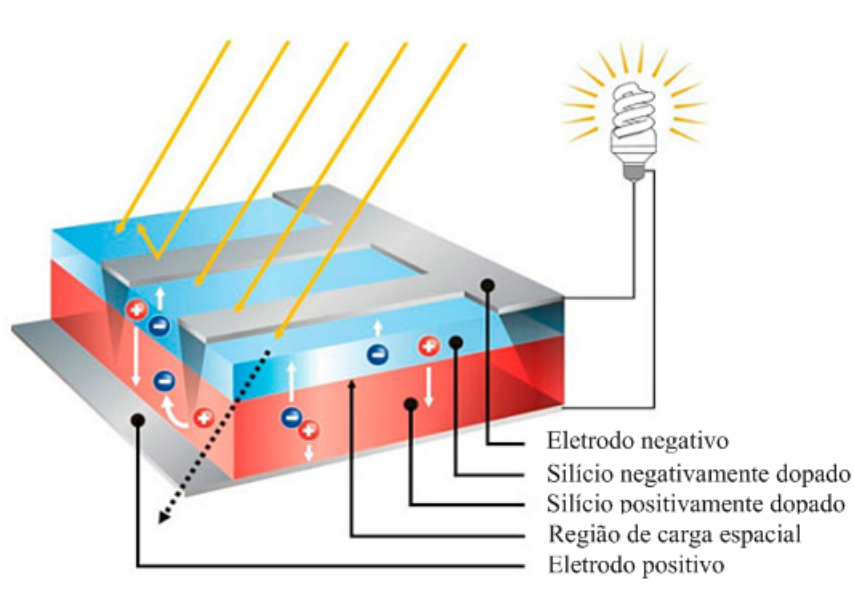


Figura 2 – Célula fotoelétrica.

Fonte: [4].

Os painéis solares constituem-se da junção de inúmeras células fotovoltaicas, sendo revestidas de vidro, polímero e alumínio para que as mesmas estejam sob proteção de forças mecânicas e intempéries. Elas são instalados normalmente em coberturas de casas, edifícios e estacionamentos, ou no solo [4].

1.1.2 Panorama Mundial

Devido à queda do custo a quantidade de energia gerada através de painéis solares deve crescer cerca de 6 vezes até 2030 [5].

O custo de produção desses painéis está reduzindo cada vez mais com o passar dos anos e, de acordo com a IRENA, está se tornando mais viável que o gás natural e usinas de carvão, seus concorrentes diretos [5].

A Figura 3 mostra o crescimento da geração solar fotovoltaica no mundo.

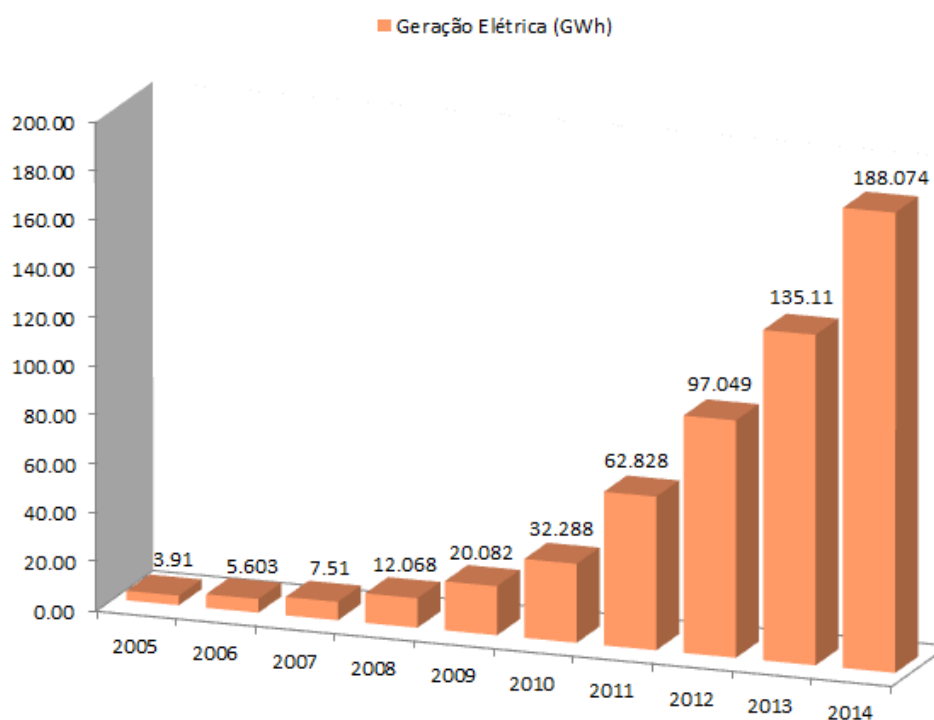


Figura 3 – Geração de energia elétrica por fonte solar fotovoltaica.

Em 2030, as usinas solares poderão ser responsáveis por cerca de 8% a 13% de toda geração mundial de eletricidade, em comparação aos 1.2% gerados no fim de 2015 [5].

1.1.3 Panorama Nacional

Em primícia as aplicações de energia solar fotovoltaica eram voltadas para o setor de telecomunicações, áreas rurais, alguns serviços públicos, bombeamento de água e como fonte de pesquisa. Até o ano de 2010 grande parte desta tecnologia se fazia presente nas universidades e em centros de pesquisa e desenvolvimento, tendo como objetivo apenas o estudo de viabilidade técnica e econômica de sua implementação em todo território nacional. Uma situação muito distinta de países desenvolvidos, pois, devido às políticas públicas lá estabelecidas, a implantação dessa tecnologia já havia sido empregada em larga escala [6].

Os grandes obstáculos existentes no mercado nacional eram:

- Alto custo de implantação;
- Ausência de subsídios para sistemas de larga escala conectados a rede;
- Ausência de tecnologia nacional;
- Ausência de regulamentação para conexão na rede;
- Falta de organização na legislação de implantação.

A radiação média incidente no Brasil é um dos fatores que justificam a implantação de energia solar fotovoltaica, além dessa justificativa, é possível observar a chegada de empresas nacionais e internacionais atuantes neste setor, tanto produzindo ou instalando painéis solares [6].

Em 2011, devido à queda de preços e o desenvolvimento e políticas de incentivo, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) passa a se dedicar na elaboração de uma regulamentação mais adequada para o setor, impactando significativamente na geração de energia por fonte solar fotovoltaica [6].

A Figura 4 mostra esse crescimento.

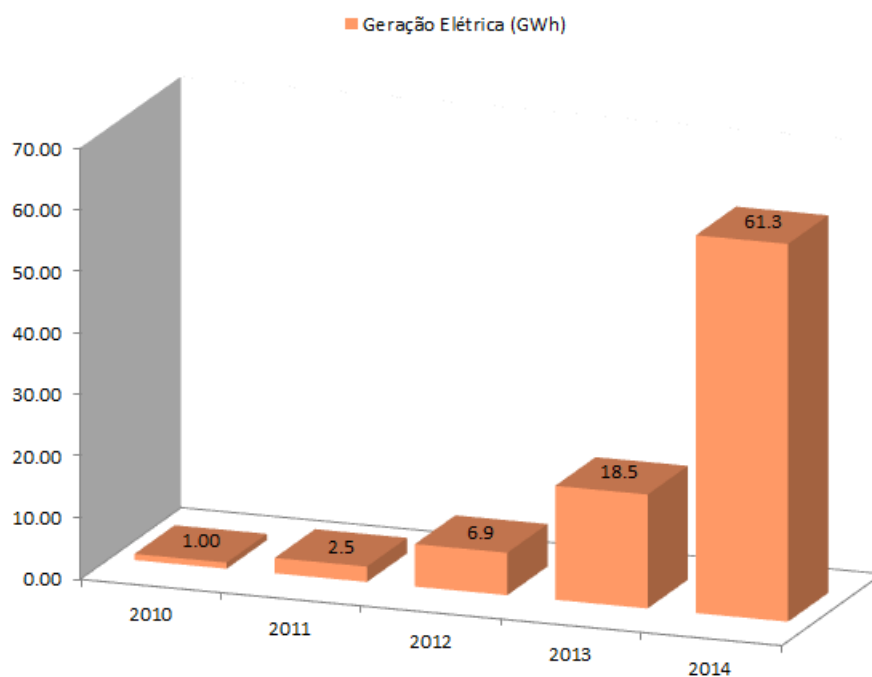


Figura 4 – Crescimento da geração de elétrica por fonte solar fotovoltaica no Brasil.

A geração de energia solar fotovoltaica existente no Brasil antes de 2010 era voltada exclusivamente para suprir necessidades energéticas locais em sistemas isolados (sistemas off-grid) e para fins de pesquisa e desenvolvimento.

De acordo com [7], estima-se um cenário onde a energia solar fotovoltaica represente cerca de 13% do consumo de energia elétrica em 2024.

A Figura 5 a seguir mostra a projeção de crescimento.

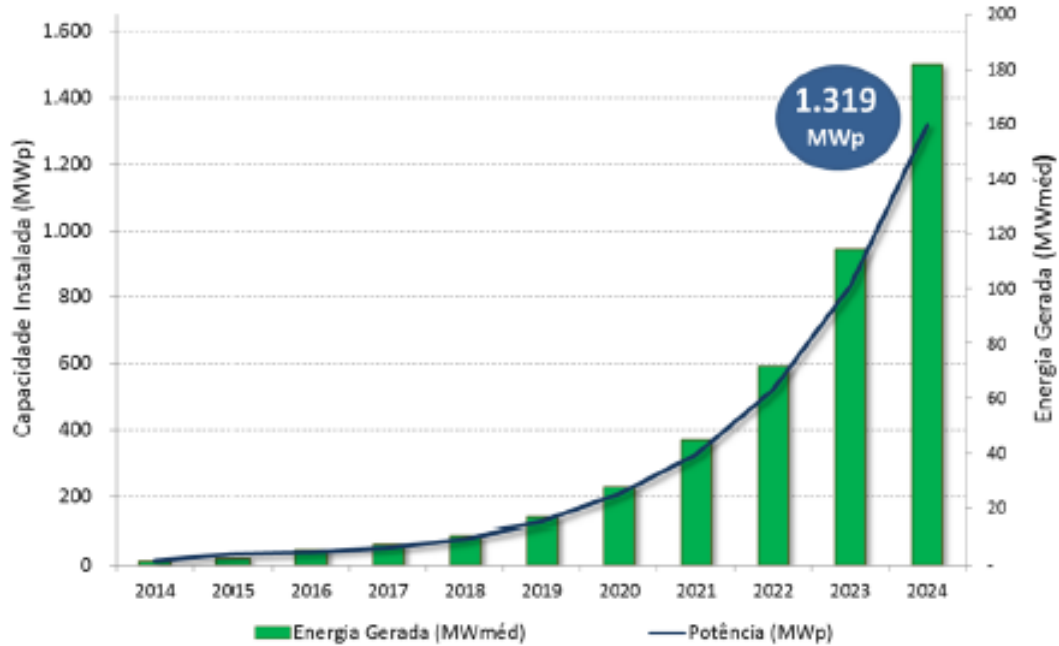


Figura 5 – Evolução de capacidade instalada e energia solar gerada.

Fonte: [7].

1.2 Geração Eólica

1.2.1 Aproveitamento Energético

Em aplicações de grande escala, a geração de eletricidade a partir de aproveitamento eólico teve início na Dinamarca em 1980 quando pequenas companhias de equipamentos agrícolas iniciaram seu processo de fabricação. Turbinas essas que possuíam uma capacidade de geração que girava em torno de 30 kW a 55 kW , valores esses que são bem inferiores quando comparados com os valores atuais, onde já existem turbinas com capacidade de geração de 5 MW [8].

A energia cinética contida no vento é dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1.1)$$

Onde:

E_c - Energia cinética do vento em Joules [J].

m - Massa do vento em quilogramas [kg].

v - Velocidade do vento em metros por segundo [m/s].

A equação 1.1 descreve o vento como um objeto de massa fixa, entretanto, como o vento é composto de moléculas de ar em constante movimento definimos que a quantidade de massa m incidente sobre o eixo do rotor em um determinado tempo é igual ao produto da velocidade do vento, a densidade do ar e a área incidente no rotor [9].

A Figura 6 ilustra a vazão mássica incidente.

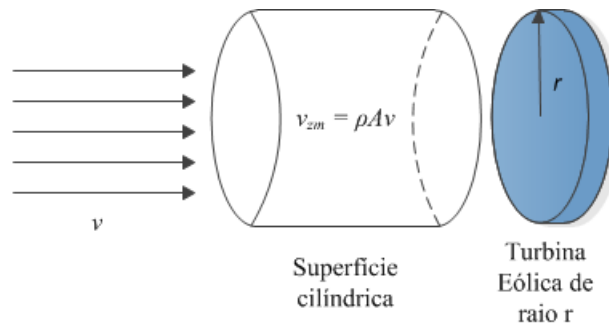


Figura 6 – Vazão mássica incidente no rotor.

A energia cinética contida no vento então será:

$$\frac{dE_c}{dt} = P = \frac{1}{2} v_{zm} v^2 \quad (1.2)$$

$$v_{zm} = \rho A v \quad (1.3)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1.4)$$

Onde:

P - Potência extraída do vento em watts [W].

v_{zm} - Vazão mássica em quilogramas por segundo [kg/s].

ρ - Densidade do ar em quilogramas por metro cúbico [kg/m^3].

A - Área incidente do vento no rotor em metros quadrados [m^2].

Em 1919 um físico alemão chamado Albert Betz chegou a conclusão de que nenhum tipo de turbina eólica é capaz de converter mais do que 59.3% da energia cinética contida

no vento para a energia de rotação do rotor. Essa conclusão é conhecida até hoje como limite de Betz [10].

A energia é extraída do vento pelos aerogeradores ao bloquear o vento. Para que se ocorra uma eficiência de 100 % é preciso que o aerogerador provoque uma parada total do movimento da massa de ar que incide sobre o rotor, para que isso ocorra em vez da utilização pás seria necessário possuir uma massa sólida que cobre 100 % da área incidente do vento, mas esse tipo de estrutura não converteria a energia cinética do vento em energia mecânica para o rotor. Em contra partida, ao se utilizar uma turbina com apenas uma pá o vento seria muito menos aproveitado não convertendo grande parte de sua energia cinética em energia mecânica [10].

Existe uma faixa de valores de aproveitamento que varia de acordo com cada perfil de turbina onde o limite máximo, mais conhecido como limite de Betz, seria de 59.3 %.

A Figura 7 mostra a faixa de valores para cada turbina.

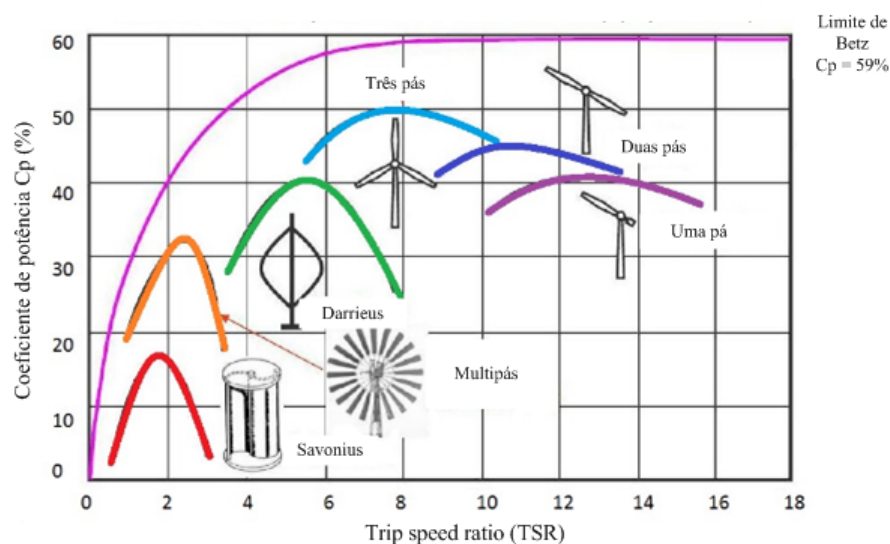


Figura 7 – Aproveitamento teórico de energia eólica.

Fonte: [11].

Considerando então a capacidade de converter a energia do vento em energia de rotação, observada Betz, podemos dizer que a potência total extraída do vento pelos aerogeradores é dada por:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3 \quad (1.5)$$

Onde:

P - Potência extraída do vento em watts [W].

C_p - Coeficiente de potência onde o valor máximo é 0.593 (Limite de Betz).

A Figura 7 mostra que a turbina que possui melhor C_p é a turbina de 3 pás, com valor máximo próximo de 50 %, por essa razão esta turbina é o tipo mais utilizado para a geração de eletricidade.

1.2.2 Panorama Mundial

Devido aos altos custos da produção de energia e as vantagens da produção de energia por fontes eólicas, vários países no mundo estabeleceram políticas de incentivo ao crescimento desta tecnologia. Ao todo cerca de 86 países utilizam desse tipo de tecnologia para a geração de eletricidade. Entre eles um país que merece destaque é a China. [13].

Até 2005 a Alemanha era líder mundial na implantação de energia eólica, mas em 2008 perdeu seu posto para os Estados Unidos. Desde 2010 a China é o maior produtor [13].

A Figura 8 mostra o crescimento mundial desta tecnologia.

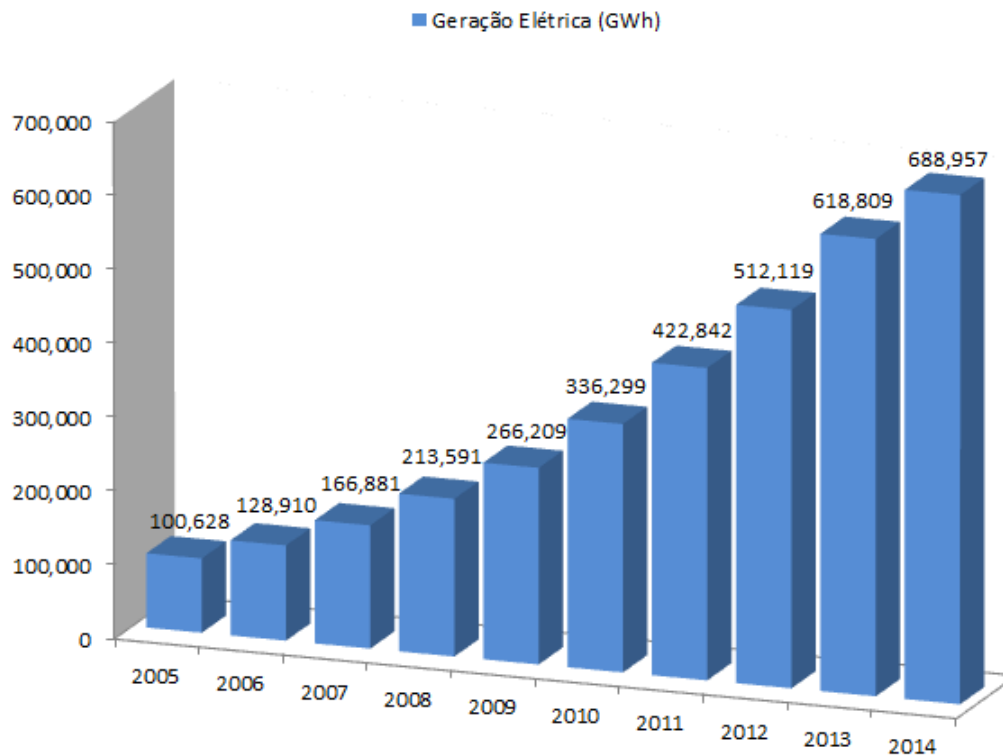


Figura 8 – Geração de energia elétrica por fonte eólica no mundo.

A geração de energia por fontes eólicas poderá ser responsável por cerca de 20 % de

toda geração de eletricidade no mundo. Essa conclusão foi feita pela Global Wind Energy Council (GWEC), divulgada no dia 18 de outubro de 2016 em seu relatório bienal com o tema de geração de energia eólica no mundo [14].

1.2.3 Panorama Nacional

A energia eólica vem crescendo cada vez mais rápido no Brasil, havendo um grande avanço regulatório devido a inclusão de políticas de incentivo, fomentando assim o crescimento desse tipo de tecnologia, considerada hoje como uma fonte de energia limpa sendo competitiva com fontes de energia tradicionais [15].

A energia eólica é hoje uma fonte nova que já faz parte dos planos de expansão do SEP. Os custos dessa tecnologia vêm caindo, devido a fatores como a crise em 2008 – 2009, barateando o preço da importação, curva de aprendizagem e ao desenvolvimento das indústrias de equipamentos no país [15].

A Figura 9 mostra o crescimento desse tipo de geração no país [15].

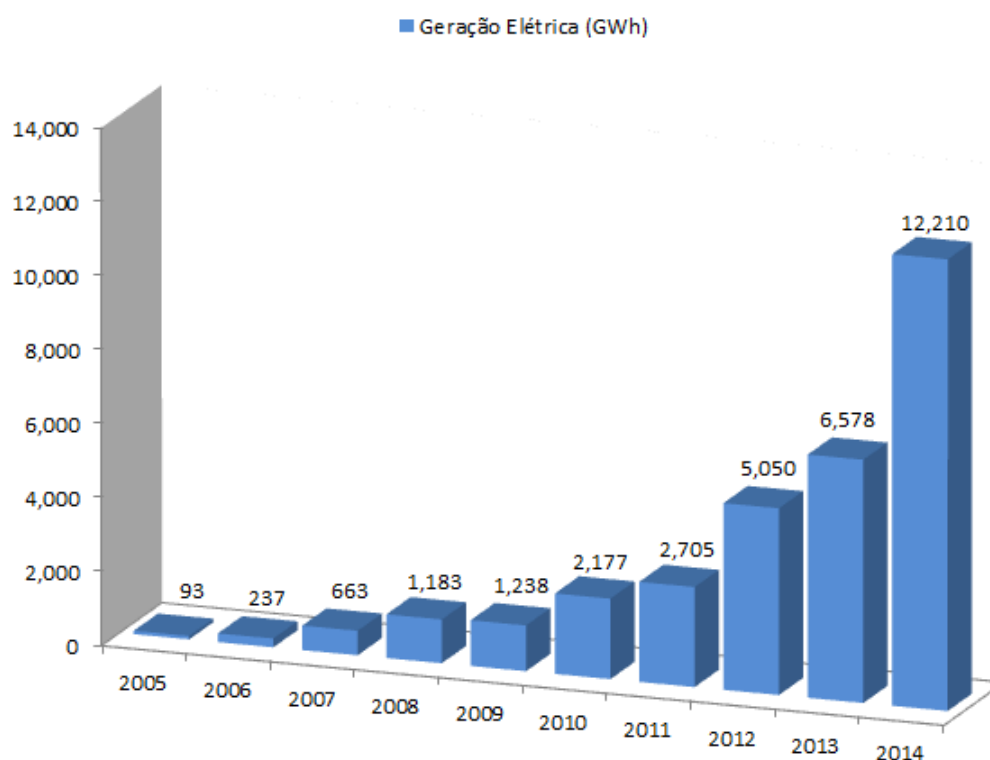
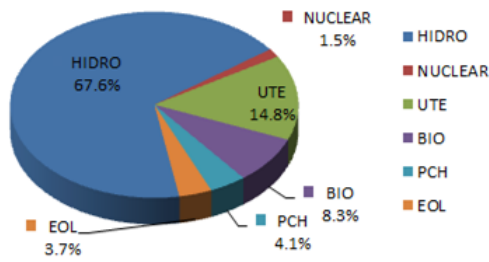


Figura 9 – Geração elétrica por fonte eólica no Brasil.

Devido à este crescimento, principalmente na região Nordeste, se fez necessário uma adequação ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com finalidade de escoamento de energia das usinas já licitadas.

A Figura 10 mostra o crescimento esperado de acordo com [7].

**Participação das Fontes de Geração
Dezembro/2014**



**Participação das Fontes de Geração
Dezembro/2024**

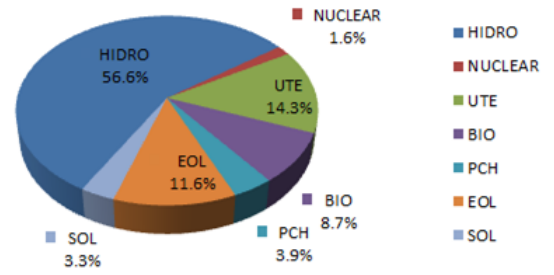


Figura 10 – Evolução da geração de energia no Brasil.

Tabela 1 – Capacidade instalada dos componentes de geração elétrica no Brasil em dezembro de 2014.

Fonte	Potência instalada (GW)	Percentual (%)
HIDRO	90	67.6
NUCLEAR	2	1.5
TERMO	19.7	14.8
BIOMASSA	11	8.3
PCH	5.5	4.1
EÓLICA	4.9	3.7
Total	133.1	100

Tabela 2 – Capacidade instalada estimada dos componentes de geração elétrica no Brasil em dezembro de 2024.

Fonte	Potência instalada (GW)	Percentual (%)
HIDRO	117	56.7
NUCLEAR	3	1.6
TERMO	30	14.3
BIOMASSA	18	8.7
PCH	8	3.8
SOLAR	7	3.3
EÓLICA	24	11.6
Total	206.7	100

De acordo com [7], a capacidade instalada de aproveitamento eólico saltará de 4.9 GW para 24 GW em 2024, ocupando cerca de 11.6% da capacidade instalada total.

1.3 Identificação do Problema

A matriz elétrica brasileira é composta predominantemente por usinas hidrelétricas, com geração complementar de usinas termelétricas, nucleares, eólicas e fotovoltaicas. Sua condição estrutural está sob a forma de geração realizada por grandes unidades posicionadas a longas distâncias dos centros de consumo, necessitando assim de um complemento de sistemas, como sistemas transmissão e sistemas de distribuição, com a finalidade de transportar essa energia gerada até os consumidores.

As usinas hidroelétricas são, na atualidade, os tipos de usinas mais comuns no território brasileiro devido ao grande potencial hídrico existente, elas convertem a energia cinética e a diferença de pressão da água, proveniente de seu deslocamento forçado, em energia elétrica. Entretanto usinas hidrelétricas ocasionam grandes impactos ambientais, como por exemplo [16]:

- i)* Alagamento de grandes áreas;
- ii)* Interferência na diversidade biológica da região;
- iii)* Realocação de um grande número de pessoas;
- iv)* Emissão de gases de efeito estufa.

As usinas termelétricas possuem a capacidade de converter a energia térmica, obtida através da queima de combustíveis fósseis, em energia elétrica. Mesmo com grandes técnicas de redução de poluentes sendo desenvolvidas e implementadas, a quantidade de gases, produzidos através da queima de combustíveis, relacionados com a poluição do ar e, da geração de efeito estufa, ainda são elevados, ocasionando assim um grande impacto ambiental [2].

As usinas nucleares tem um processo de conversão de energia semelhante ao processo de uma usina termelétrica, com diferença básica no tipo de combustível utilizado para a queima, no caso da usina nuclear o combustível utilizado é usualmente o urânio. Os rejeitos da queima do urânio são radioativos e em função disso apresentam alta periculosidade no manuseio, transporte e armazenamento. Desastres naturais são associados também a esse tipo de geração, como por exemplo, Fukushima (Japão) e Chernobyl (Ucrânia) [2].

Outros problemas relacionados com a geração de eletricidade é com a dificuldade de encontrar grandes áreas para a implementação de grandes centros geradores, pois isso se torna inviável devido aos impactos supracitados. Em função disto, o conceito de se levar a geração mais próxima à carga cresceu muito nos últimos anos, mais conhecido como Geração Distribuída (GD). Esse conceito pode ser uma solução para os possíveis problemas a serem enfrentados com o aumento recorrente da demanda energética.

Consideradas fontes de energia “limpa” e em abundância, ou seja, fontes de energia

cujo o impacto ambiental pode ser considerado nulo e podem ser aproveitadas em qualquer ponto geográfico, as energias eólicas e solares têm ganhado bastante espaço nas discussões sobre geração de eletricidade junto com a GD. Entretanto, inserir e controlar a operação destas tecnologias com o SIN representa uma grande revolução nos conceitos atuais utilizados no SEP e apresenta grandes desafios para a engenharia.

1.4 Motivação e Objetivos

Atualmente existe grande utilização de geração de energia elétrica por fontes renováveis, dentre as de grande destaque, energias eólicas e solares apresentam características diferenciadas quando comparadas com as demais.

Sabendo da existência de intermitência de geração para esses casos, as características elétricas, como por exemplo níveis de tensão, frequência elétrica e ângulo de potência, podem não ser as mesmas da rede elétrica à ser conectada, então se faz necessário a utilização de conversores estáticos para condicionar a energia na sua forma primária, seja ela eólica ou solar fotovoltaica, de acordo com as características da rede a ser conectada [2].

Para o presente trabalho têm-se como objetivo os seguintes pontos:

- i)* Estudar e implementar circuito de sincronismo para sistemas monofásicos;
- ii)* Estudar e implementar circuito de sincronismo para sistemas trifásicos;
- iii)* Estudar e implementar os sistemas de sincronismo digitalmente;
- iv)* Implementar a técnica de separação em componentes de sequência e extração de componente de sequência positiva (*seq +*).
- v)* Implementar as técnicas estudadas no software PSIM e analisar os resultados.

1.5 Estrutura da Monografia

No capítulo 2 serão discutidos os principais conceitos para a realização do sincronismo do ângulo de potência de geradores monofásicos. Após esse detalhamento serão apresentados os conceitos de filtragem do sinal monofásico e sincronismo com rede monofásica na presença de harmônicos.

No capítulo 3 será apresentado o circuito de sincronismo do ângulo de potência de geradores trifásicos com rede trifásica equilibrada. Logo após, serão expostos os conhecimentos de filtragem de sinal e de sincronismo com rede trifásica desequilibrada e na presença de harmônicos. E por fim, serão detalhadas as estruturas de implementação na forma digital a partir de um método de integração discreto chamado método de Euler Regressivo.

No capítulo 4 serão mostrados resultados obtidos a partir da implementação dos conceitos apresentados nos capítulos 2 e 3 analisando os resultados obtidos. Como ferramenta de simulação foi utilizado o softwares PSIM.

No capítulo 5 as principais conclusões acerca do desenvolvimento do presente trabalho e propostas para possíveis trabalhos futuros serão discutidas.

2 CIRCUITO DE SINCRONISMO MONOFÁSICO

2.1 Fluxo de Potência

Redes elétricas possuem uma grande complexidade, pois não se trata de um sistema que pode operar sob quaisquer condições, condições mínimas de qualidade deverão sempre serem atendidas. Se tratando de uma rede elétrica, a garantia de uma boa qualidade no fornecimento de energia está associado aos seguintes parâmetros:

- Nível de tensão;
- Frequência elétrica;
- Fluxo de potência ativa;
- Fluxo de potência reativa.

A ocorrência de variação de carga ao longo do dia e possíveis eventualidades, como curto-circuitos, comprometem a qualidade do fornecimento de energia, isso torna a rede elétrica um sistema dinâmico de complexa operação.

Um dos parâmetros mais importantes de uma rede elétrica é seu respectivo fluxo de potência. O mesmo é proporcional a abertura angular na rede com sentido de deslocamento de um ponto com maior ângulo para um ponto com menor ângulo.

A Figura 11 ilustra um fluxo de potência entre uma barra geradora 1 e uma barra de carga 2.

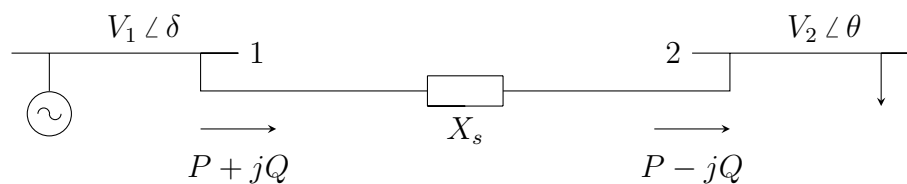


Figura 11 – Diagrama esquemático do fluxo de potência entre geração e carga.

A equação do fluxo de potência ativa simplificada é dada por:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_s} \text{sen}(\delta - \theta) \quad (2.1)$$

A partir da equação 2.1 é possível perceber que o valor de potência ativa é diretamente proporcional a defasagem angular entre as barras. O controle dessa defasagem controla a quantidade de potência e o sentido do fluxo. Para um valor de $\delta - \theta < 0$ temos que $P < 0$, isso significa que ocorre uma inversão de fluxo de potência ativa.

O mesmo princípio deve ser seguido ao se considerar a inclusão do gerador renovável em qualquer ponto do sistema elétrico de potência.

Para controlar o fluxo de potência entre o sistema GD e a rede, é preciso saber com exatidão o valor angular de operação da rede em um dado instante, para que o ângulo do gerador distribuído seja escolhido de acordo com a potência a ser injetada. Deve-se garantir também que a frequência das grandezas do sistema GD seja a mesma da rede elétrica.

2.2 Circuito de Sincronismo

O de sincronismo, usualmente chamado de PLL (do inglês, *Phase-locked loop*), é um circuito disposto em malha fechada constituído de um oscilador que é controlado por um sinal periódico externo, seja um sinal de tensão ou corrente, sendo capaz de detectar a fase, a frequência e a amplitude deste mesmo sinal, mesmo em situações de ocorrência de harmônicos [19].

A técnica de PLL é frequentemente usada em áreas de comunicação sem fio, transmissão de dados digitais, computadores e eletrônica moderna [17].

O PLL têm como finalidade estimar a frequência de um sistema. A partir de uma malha de realimentação o PLL executa suas funções realizando a comparação da fase do sinal de saída com a do sinal de entrada atuando na diferença, ou seja, no erro. Não havendo erro, o sistema se atinge o estado permanente, mantendo assim um valor fixo de resposta [17].

2.2.1 Estrutura básica

A estrutura básica de um circuito PLL é mostrado na Figura 12.

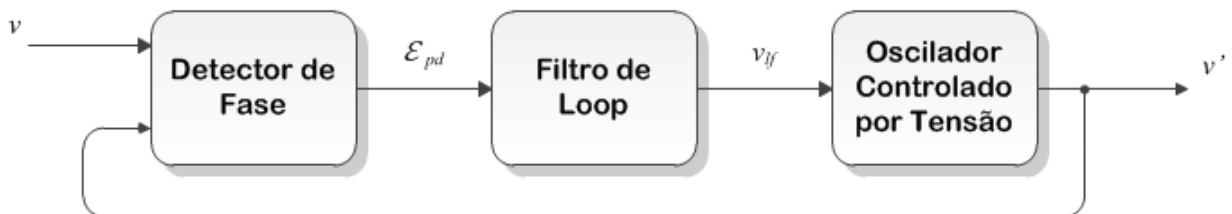


Figura 12 – Estrutura básica do PLL.

O PLL consiste fundamentalmente em três blocos que são [17]:

- **Detector de fase (PD):** Este bloco têm por finalidade realizar a comparação dos sinais obtidos na saída do PLL com um sinal de referência.

- **Filtro (LF).** O filtro (LF) realiza a filtragem do sinal de erro oriundo das comparações entre os sinais de saída com o sinal de entrada. Esta filtragem permite a obtenção do valor CC do erro.
- **Oscilador Controlado por Tensão (VCO).** O bloco *Oscilador Controlado por Tensão* (do inglês, *Voltage Controlled Oscillator*) (VCO) utiliza o valor da componente CC como um sinal de tensão de entrada do VCO, sua saída é um sinal CA cuja frequência é tal que permita que o valor CC deste sinal seja igual ao valor CC de sua entrada.

A Figura 13 mostra o diagrama de blocos de um PLL básico.

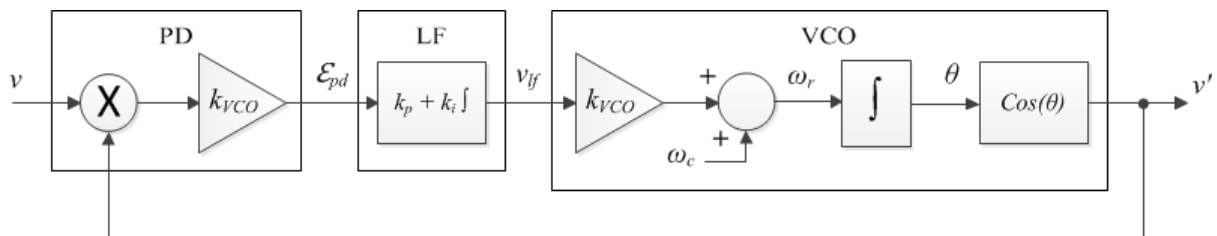


Figura 13 – Diagrama de blocos do PLL.

Onde:

- ε_{pd} - Erro do detector de fase;
- v_{if} - Sinal CC do erro;
- ω_r - Frequência de ressonância.

2.2.2 Modelagem matemática do PLL

Pelo diagrama de blocos exibido na Figura 13, PD é implementado por um multiplicador dos sinais de entrada e saída, o LF têm sua estrutura baseada em um controlador proporcional-integral (PI) e o VCO consiste em um integrador e uma função senoidal [17].

O diagrama de blocos da Figura 13 pode ser expresso no domínio da frequência usando a transformada de Laplace [17].

A Figura 14 mostra o diagrama de blocos no domínio da frequência. A partir da mesma têm-se:

- **Detector de Fase:**

$$E_{pd}(s) = \frac{V}{2} [V(s) - V'(s)] \quad (2.2)$$

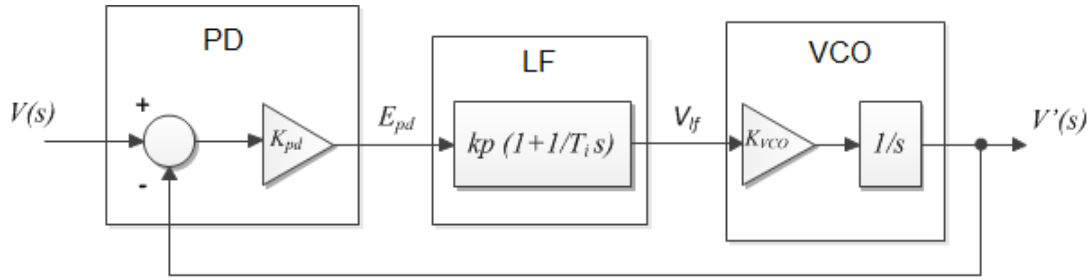


Figura 14 – Diagrama de Blocos linearizado do PLL.

- **Filtro de loop:**

$$V_{lf}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E_{pd}(s) \quad (2.3)$$

- **VCO**

$$V'(s) = \frac{1}{s} V_{lf}(s) \quad (2.4)$$

A Função de Transferência de Malha Aberta do sistema é:

$$H_{ab}(s) = \frac{k_p + \frac{k_p}{T_i}}{s^2} \quad (2.5)$$

A Função de Transferência de Malha Fechada é:

$$H_{\theta}(s) = \frac{V'(s)}{V(s)} = \frac{k_p s + \frac{k_p}{T_i}}{s^2 + k_p s + \frac{k_p}{T_i}} \quad (2.6)$$

O erro de malha fechada é dado por:

$$E_{\theta} = \frac{E_{pd}(s)}{V(s)} = 1 - H_{\theta}(s) = \frac{s^2}{s^2 + k_p s + \frac{k_p}{T_i}} \quad (2.7)$$

De acordo com a função de transferência (2.6) o PLL apresenta uma característica de filtragem passa-baixa, o que é um comportamento desejado para a atenuação do erro proveniente de possíveis ruídos e harmônicos de altas ordens existentes no sinal. A equação (2.5) pode ser reescrita na seguinte forma canônica [17]:

$$H_{\theta}(s) = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.8)$$

Onde:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_p}{T_i}} \quad \text{e} \quad \zeta = \frac{\sqrt{k_p T_i}}{2} \quad (2.9)$$

Para cada escolha de ω_n e ζ , o sistema irá responder de forma distinta. Para valores elevados de ζ , dado um k_p constante, a constante de tempo T_i será elevada, implicando em um sistema com resposta mais lenta e com filtragem mais seletiva. Para valores de ω_n elevados, dado um k_p constante, a constante T_i será baixa, implicando em um sistema com resposta mais rápida e filtragem menos seletiva.

Em [17] encontra-se uma expressão capaz de determinar o tempo de convergência t_s do controlador PI aplicado, onde a tolerância de erro entre o sinal de referência e o sinal de saída do controlador é de 1% em estado permanente.

O valor de t_s é dado por:

$$t_s = 4.6 \tau \quad \text{onde} \quad \tau = \frac{1}{\zeta \omega_n} \quad (2.10)$$

Através de uma manipulação matemática das equações (2.9) e (2.10) é possível determinar o valor de k_p e T_i a serem utilizados no controlador PI [17].

Os valores de k_p e T_i são dados por:

$$k_p = 2\zeta\omega_n = \frac{9.2}{t_s}, \quad T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} = \frac{t_s\zeta^2}{2.3} \quad (2.11)$$

A equação 2.11 só é válida para aplicações onde a amplitude do sinal de entrada é unitário ($|v| = 1$), no caso de aplicações para amplitudes distintas, os parâmetros calculados pela equação (2.11) deverão ser normalizados utilizando a amplitude do sinal de entrada [17].

2.3 Sistemas trifásicos

2.3.1 A transformada de Clarke

A transformada de Clarke, usualmente conhecida como transformada $\alpha\beta 0$ permite a representação de um sistema trifásico em um sistema com três sinais em quadratura, em que um sinal corresponde a sequência zero [21].

A transformação $\alpha\beta 0$ é definida por [21]:

$$v_{\alpha\beta 0} = T_{\alpha\beta 0} v_{abc} \quad (2.12)$$

Onde:

v_{abc} - Tensões trifásica nas coordenadas abc ;

$T_{\alpha\beta 0}$ - Matriz de transformação;

$v_{\alpha\beta 0}$ - Tensões trifásica nas coordenadas $\alpha\beta 0$.

A Figura 15 mostra a decomposição de um sistema trifásico sem componente de sequência zero em um sistema de referência $\alpha\beta$.

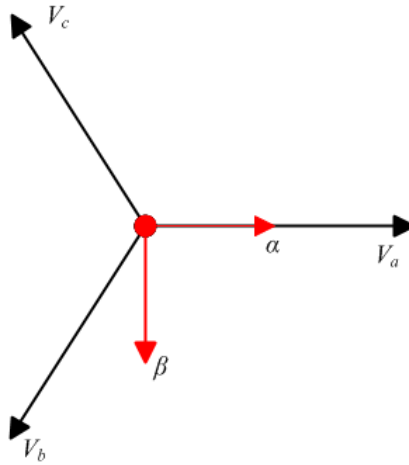


Figura 15 – Decomposição de um sistema trifásico em um sistema de referência $\alpha\beta$.

A matriz transformação $T_{\alpha\beta 0}$ é dado por [21]:

$$T_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

Considerando as tensões simétricas e da forma:

$$v_{abc} = \begin{bmatrix} V \text{sen}(\omega t + \theta) \\ V \text{sen}(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ V \text{sen}(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$

Obtêm-se os seguintes valores de tensões transformadas:

$$v_{\alpha\beta 0} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V \text{sen}(\omega t + \theta) \\ V \cos(\omega t + \theta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Para um sistema equilibrado o componente v_α está em fase com a fase a do sistema abc , o componente v_β está em quadratura de v_α e $v_0 = 0$ [21].

Para obter v_{abc} a partir de $v_{\alpha\beta 0}$ basta realizarmos a seguinte operação:

$$v_{abc} = T_{\alpha\beta 0}^{-1} v_{\alpha\beta 0} \quad (2.13)$$

Onde:

$$T_{\alpha\beta 0}^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} T_{\alpha\beta 0}^T$$

Para um sistema simétrico a $T_{\alpha\beta 0}$ será reduzido para [21]:

$$T_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

E os respectivos valores de v_{abc} e $v_{\alpha\beta}$ podem ser calculados a partir:

$$v_{abc} = T_{\alpha\beta} v_{\alpha\beta} \quad (2.14)$$

$$v_{abc} = \frac{2}{3} T_{\alpha\beta}^T v_{\alpha\beta} \quad (2.15)$$

2.3.2 A transformada de Park

A transformada Park, usualmente conhecida transformada dq , permite a representação de um sistema trifásico equilibrado em um sistema de dois vetores ortogonais de valor constante que giram de acordo com a frequência do sinal a ser transformado [20].

Para um sinal em sistema de referência $\alpha\beta$ a transformação dq é dada por [20]:

$$v_{dq} = P_{\alpha\beta dq} v_{\alpha\beta} \quad (2.16)$$

Onde:

$v_{\alpha\beta}$ - Tensões em referência de $\alpha\beta$;

$P_{\alpha\beta dq}$ - Matriz de transformação $\alpha\beta$ para dq ;

v_{dq} - Tensões transformadas.

A Figura 16 ilustra a aplicação da transformada $\alpha\beta$ e a transformada dq em um sinal trifásico.

A matriz de transformação $P_{\alpha\beta dq}$ é dada por [20]:

$$P_{\alpha\beta dq} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) \\ -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

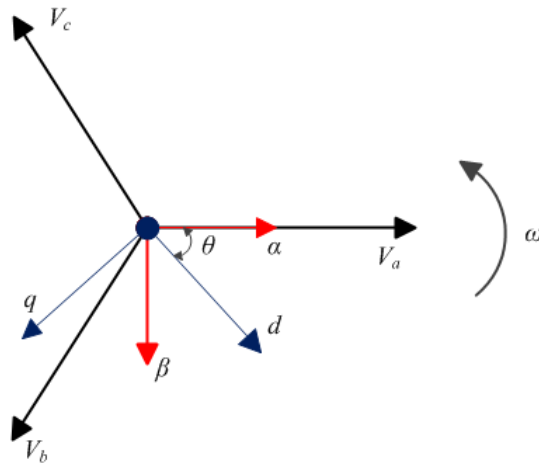


Figura 16 – Decomposição de um sistema trifásico em sistema de referência $\alpha\beta$ e dq .

Para a obtenção das coordenadas $\alpha\beta$ a partir de um sinal em coordenadas dq basta inverter a matriz de transformada $P_{\alpha\beta dq}$ e multiplicar pelo vetor v_{dq} [20].

$$v_{\alpha\beta} = P_{\alpha\beta dq}^{-1} v_{dq} \quad (2.17)$$

Onde:

$$P_{\alpha\beta dq}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\text{sen}(\omega t) \\ \text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

2.4 Filtragem de Sinal através do Integrador Generalizado de Segunda Ordem

A partir do Integrador Generalizado de Segunda Ordem (do inglês, Second Order Generalized Integrator)(SOGI), utiliza-se uma estrutura denominada DSOGI-PLL, sua função é a realização de uma filtragem de um determinado sinal e geração de dois sinais em quadratura. Esses novos sinais resultantes são os parâmetros de entrada de uma estrutura capaz de detectar a sequência positiva e negativa do sinal em coordenadas $\alpha\beta$ [2].

Após a extração, os sinais de sequência positiva, em coordenadas $\alpha\beta$, são transformados para componentes em sistemas de referência dq e então o circuito PLL é empregado para o rastreamento do ângulo da componente fundamental de sequência positiva do sinal original [2]. Em um sistema monofásico uma simplificação da implementação do esquema supracitado pode ser realizada. Proposto por Karimi Ghartemani e Iravani (2004) denominado Circuito de Sincronismo Melhorado (do inglês, Enhanced Phase-Locked Loop) (EPLL), o EPLL é, em sua composição, um filtro de estrutura semelhante ao filtro notch, com finalidade de minimização do produto entre dois sinais em quadratura.

A Figura 17 ilustra a implementação do SOGI.

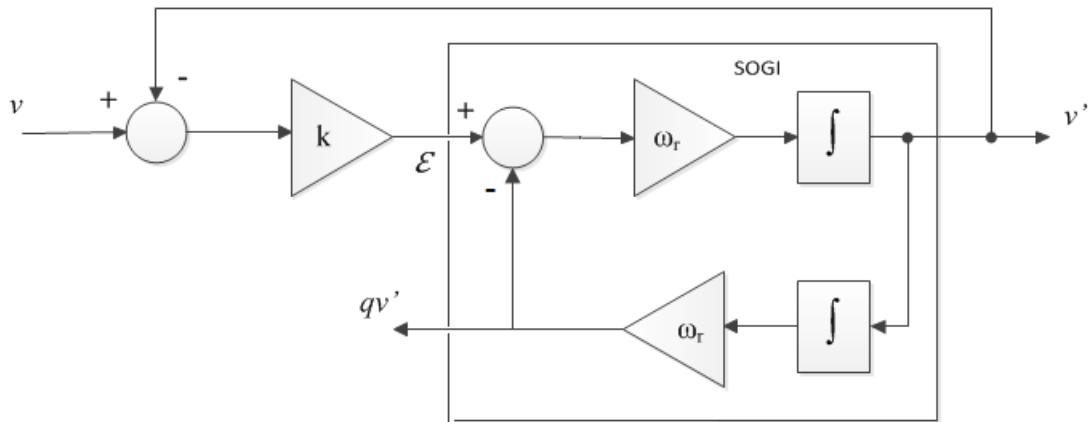


Figura 17 – Circuito de filtragem baseado no SOGI.

A função de transferência do SOGI é:

$$H_s(s) = \frac{v'(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{\omega_r s}{s^2 + \omega_r^2} \quad (2.18)$$

Onde:

$x(s)$ - Sinal de entrada do SOGI;

$v'(s)$ - Sinal de saída do SOGI;

ω_r - Frequência de ressonância do SOGI.

O circuito descrito pela Figura 17 origina um filtro Passa-Faixa (do inglês, *Band-Pass Filter*) (BPF) de segunda ordem. As funções de transferência são dadas por:

$$V(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega_r s}{s^2 + k\omega_r s + \omega_r^2} \quad (2.19)$$

$$Q(s) = \frac{qv'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega_r^2}{s^2 + k\omega_r s + \omega_r^2} \quad (2.20)$$

Se ω_r e k forem escolhidos de forma apropriada, a saída v'_α será praticamente da mesma característica da componente fundamental de v_α [2].

O sinal qv' será em quadratura do sinal v' , sendo muito utilizado para a obtenção de componentes simétricas [2].

Para que o processo de rastreamento do ângulo de operação da rede se inicie deve ser somado um valor de frequência de referência ω_c

A Figura 18 mostra a aplicação do SOGI na implementação de um PLL monofásico.

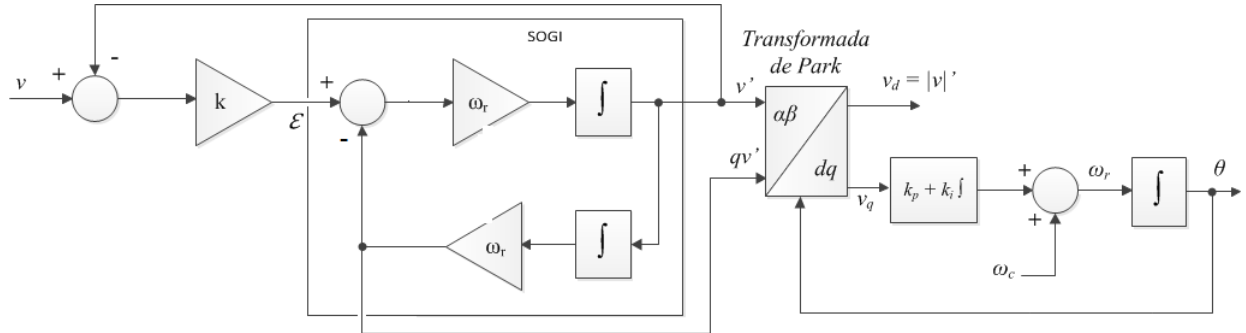


Figura 18 – Estrutura de Filtragem de sinal monofásico.

Onde:

v - Sinal de entrada;

v' - Sinal semelhante a v ;

qv' - Sinal em quadratura de v' ;

v_q - Sinal resultante de eixo direto da aplicação da transformada dq ;

v_d - Sinal em quadratura de v_q ;

ω_c - Frequência de referência.

θ - Ângulo rastreado.

3 CIRCUITO DE SINCRONISMO TRIFÁSICO

Estruturas monofásicas são pouco utilizadas no SEP, então, no presente capítulo será apresentado o uso dos mesmos conceitos apresentados no capítulo 2 estendidos agora para sistemas trifásicos.

3.1 Transformada de Park

Como foi apresentado na seção 2.3.2, a transformada Park têm por finalidade transformar grandezas trifásicas equilibradas em dois sinais em quadratura e estacionários que giram na frequência angular do sinal transformado [20].

Essa transformação é dada por:

$$v_{dq0} = T_{dq0} v_{abc} \quad (3.1)$$

Onde:

v_{abc} - Tensões trifásicas;

T_{dq0} - Matriz de transformação;

v_{dq0} - Tensões transformadas.

A matriz transformação T_{dq0} é dada por:

$$T_{dq0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\text{sen}(\omega t) & -\text{sen}(\omega t - 2\pi/3) & -\text{sen}(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

Para a obtenção dos valores v_{abc} a partir de v_{dq0} basta inverter a matriz T_{dq0} e realizar o produto com o vetor v_{dq0} , ou seja:

$$v_{abc} = T_{dq0}^{-1} v_{dq0} \quad (3.2)$$

Onde:

$$T_{dq0}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \text{sen}(\omega t + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix}$$

Para um sistema equilibrado, $v_0 = 0$ e a matriz T_{dq0} será reduzida para [17]

$$T_{dq} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\text{sen}(\omega t) & -\text{sen}(\omega t - 2\pi/3) & -\text{sen}(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

E os respectivos valores de v_{abc} e v_{dq} podem ser calculados a partir:

$$v_{dq} = T_{dq} v_{abc} \quad (3.3)$$

$$v_{abc} = T_{dq}^{-1} v_{dq} \quad (3.4)$$

3.2 Circuito SRF-PLL

Uma das técnicas de sincronismo de geradores trifásicos mais usadas é a implementação do Circuito PLL Baseado no Sistema de Coordenadas Síncrono (do inglês, Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop) (SRF-PLL). Este circuito, utilizando a transformada de Park, converte os valores de tensões ou correntes abc , em dois vetores em quadratura e estacionários (sistema de referência dq) que giram em uma determinada frequência [17].

Após a transformação do sinal a posição angular dos novos sinais, agora em um sistema de referência dq , será aplicada a circuito PLL, afim de que $v_q = 0$ e o valor de v_d seja o valor da amplitude das tensões e gire em mesma frequência dos sinais de entrada [17].

A Figura 19 ilustra a aplicação do SRF-PLL.

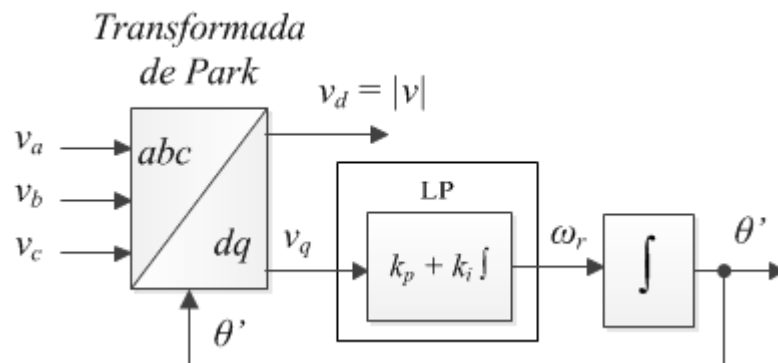


Figura 19 – Circuito SRF-PLL.

O circuito SRF-PLL não possui a boa resposta na presença de harmônicos. Ao se aumentar o ganho do LP, diminui-se a frequência de corte ω_n , ocasionando assim uma

faixa de passagem mais seletiva de frequências, entretanto isso acarretará em um tempo de sincronismo mais elevado. Para contornar tal problema existem outras estruturas que possuem melhor comportamento, quando comparado ao SFR-PLL, na realização de filtragem e na ocorrência de desbalanço entre fase [22].

3.3 Detecção de componentes de sequência em sinais desbalanceados e sob presença de harmônicos utilizando DSOGI-PLL

Em um sistema trifásico é comum o desbalanceamento entre fases e presença de harmônicos, em função disso, para a realização de um sincronismo com uma rede sob estas condições é preciso conhecer o ângulo de operação da componente fundamental de sequência positiva do sinal da rede. Para se obter tal conhecimento dividiremos o processo em duas etapas, que são:

- Utilização do SOGI para filtragem do sinal;
- Detector de componentes de sequência utilizando os sinais em quadratura.

3.3.1 Filtragem de sinal

Para a realização de filtragem de um sinal trifásico primeiramente os sinais medidos são submetidos a transformada de Clark. Estes novos sinais serão ambos processados pelo circuito SOGI.

Como exposto no capítulo 2, o circuito SOGI possui a capacidade de filtragem de um determinado sinal e geração de dois sinais em quadratura, onde um dos sinais corresponde a componente fundamental de um determinado sinal com harmônicos.

A Figura 20 ilustra este processo.

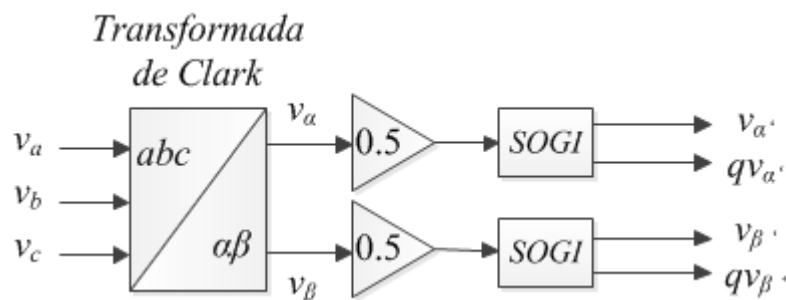


Figura 20 – Filtragem de sinal trifásico.

O sinal v_α' , resultante da estrutura da Figura 20, está em fase com o sinal v_α e o sinal qv_α' em quadratura com v_α , o mesmo ocorre com os sinais v_β' e qv_β' [2].

3.3.2 Detecção das componentes de sequência

Após a estrutura descrita pela Figura 20 os sinais resultantes, ao serem submetidos a operações de adição e subtração, podem ser utilizados na obtenção das componentes de sequência positiva e negativa do sinal original [2].

A Figura 21 ilustra essa operação

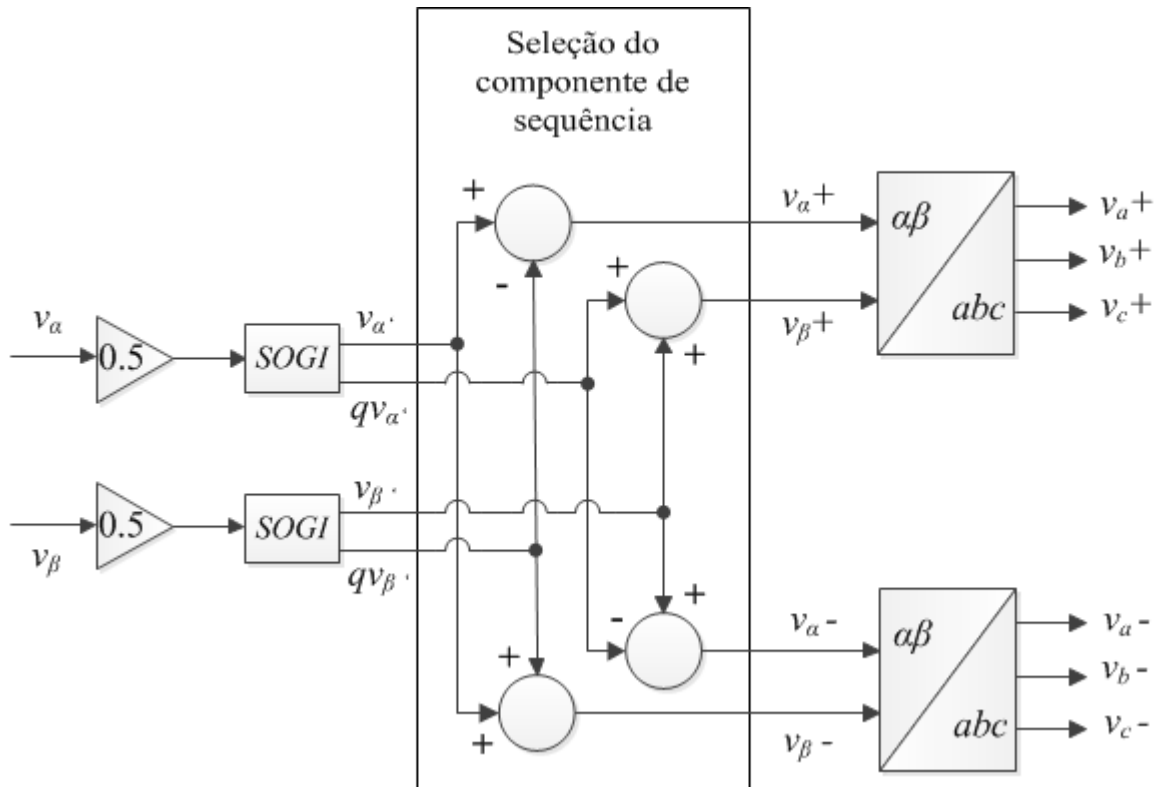


Figura 21 – Esquemático da obtenção das componentes de sequência.

Realizada a separação de componentes de sequência do sinal original em sistema de referência $\alpha\beta$, aplica-se a transformação de Park para a transformação do sinal em sistema de referência dq e utilizando um circuito SFR-PLL poderá se encontrar o ângulo de operação que será responsável pelo efetivo fluxo de potência desta rede desbalanceada e sob presença de harmônicos [2].

O circuito DSOGI-PLL é a composição dos processos supracitados, possui melhor desempenho na rejeição de harmônicos, robustez frente ao desbalanço e capacidade de separação de sequência positiva quando comparado ao SFR-PLL [2].

A Figura 22 mostra o circuito DSOGI-PLL.

Para agilizar o processo de rastreamento do ângulo de rede, a frequência de referência ω_c é somada ao circuito SFR-PLL [2].

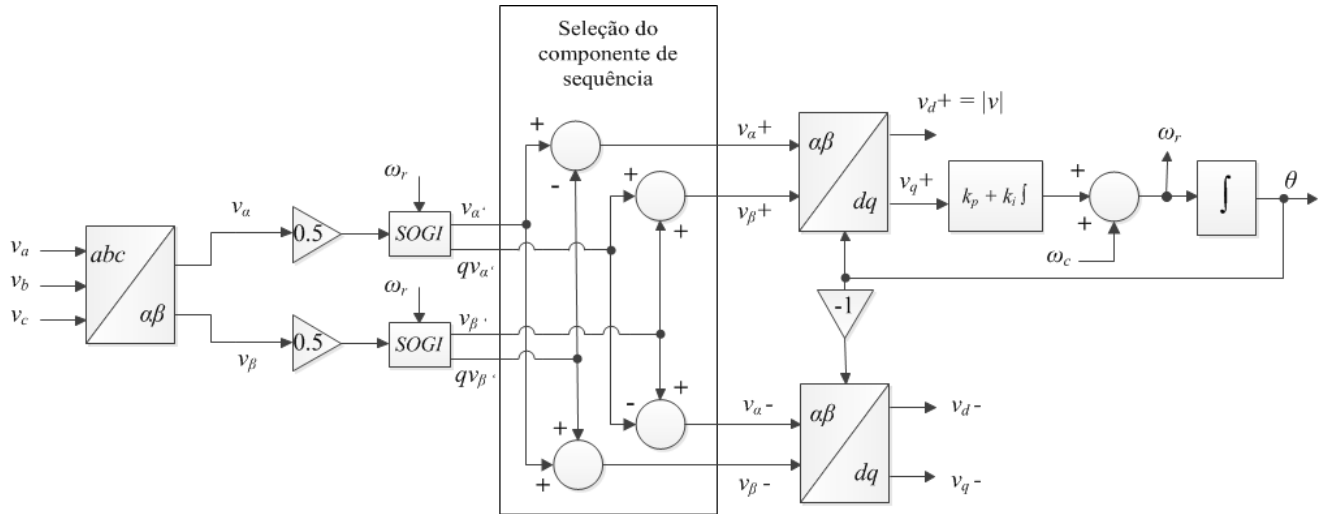


Figura 22 – Circuito DSOGI-PLL.

3.4 Implementação digital

Os controladores até aqui apresentados podem ser descritos através da utilização da transformada de Laplace, ou equações diferenciais, e considerando uma estrutura analógica de construção. Entretanto, a maioria dos controladores são implementados em estruturas digitais como microprocessadores, em função disto, devemos reestruturar um sistema de controle contínuo para um sistema de controle discreto onde os processos de integração e derivação nos componentes analógicos serão aproximados por combinações lineares [23].

Para a implementação discreta de uma integral existem diversas técnicas numéricas, sendo as seguintes as mais simples:

- Método do Euler Regressivo;
- Método do Euler Progressivo;
- Método Trapezoidal.

3.4.1 Método de Euler Regressivo

O método de Euler regressivo consiste no cálculo de área sob um determinado sinal através da soma da área de vários retângulos que estão sob a curva desejada.

Essa técnica permite uma aproximação do controlador analógico em um controlador digital.

Os métodos de Euler regressivo e progressivo seguem o mesmo princípio de cálculo, a diferença entre eles está na utilização do ponto de formação do retângulo, o método regressivo utiliza o ponto em atraso do sinal e o método de avanço utiliza o ponto em avanço do sinal.

O presente trabalho utiliza o método de Euler regressivo para a implementação dos controladores analógicos em controladores digitais devido a sua simplicidade e estabilidade.

A Figura 23 ilustra este método.

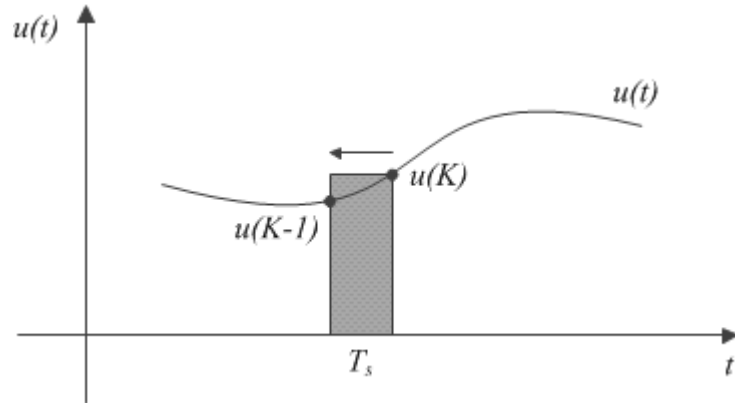


Figura 23 – Método de Euler regressivo.

A saída resultante em sinal discreto será da forma:

$$y(K) = y(K - 1) + T_s u(t) \quad (3.5)$$

Onde:

K - Valores inteiros;

$y(K)$ - Saída do sinal discreto;

$y(K - 1)$ - Saída atrasada do sinal discreto;

T_s - Período de amostragem;

$u(t)$ - Sinal de entrada contínuo.

Quanto menor for o valor de T_s melhor será esta aproximação.

4 EXECUÇÃO E RESULTADOS

4.1 Considerações primárias

No presente capítulo serão apresentados a implementação e os resultados obtidos dos conceitos apresentados nos capítulos 2 e 3. Os desenvolvimentos foram realizados através de simulação no ambiente PSIM.

As seguintes configurações de rede serão utilizadas como exemplo:

- Sistemas monofásicos;
- Sistemas monofásicos com presença de harmônicos;
- Sistemas trifásicos;
- Sistemas trifásicos com presença de harmônicos;
- Sistemas trifásicos com presença de harmônicos e desbalanço entre fases.

4.2 Sistemas Monofásicos

4.2.1 Monofásicos sem presença de harmônicos

O circuito SFR-PLL será aplicado diretamente a uma fonte de tensão do tipo $v = \sin(\omega t)$. Para o valor unitário de amplitude do sinal os parâmetros de projeto do controlador PI foram calculados pelas equações 2.11 escolhendo $\zeta = 0.7$ e $t_s = 100 \text{ ms}$.

Os valores de k_p e T_i são:

$$k_p = \frac{9.2}{100 \times 10^{-3}} = 92 \quad \text{e} \quad T_i = \frac{100 \times 10^{-3} \times 0.7^2}{2.3} = 21.3 \text{ ms}$$

A Figura 24 mostra a implementação desta técnica no ambiente PSIM.

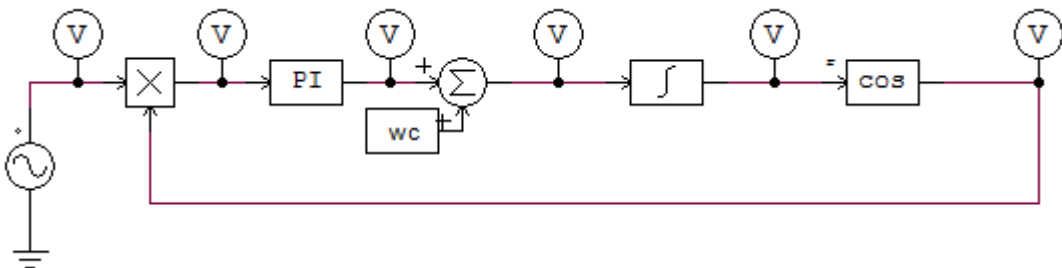


Figura 24 – Estimação do ângulo de uma rede monofásica.

Os valores escolhidos de ω_c é um *offset* utilizado para iniciar a operação do PLL além de acelerar a convergência.

As Figuras 25 e 26 mostram os resultados desta implementação para $\omega_c = 300 \text{ rad/s}$ e $\omega_c = 377 \text{ rad/s}$ respectivamente.

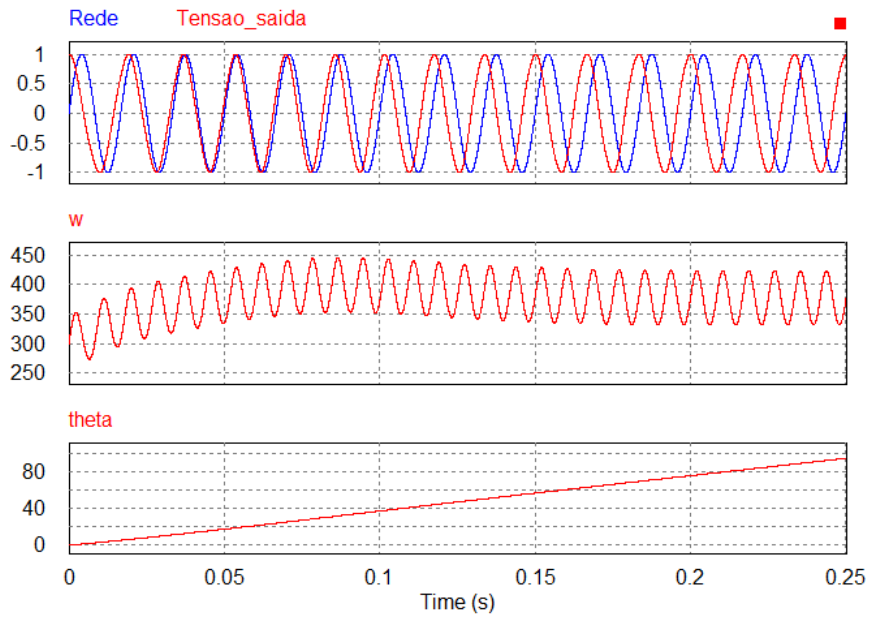


Figura 25 – Resultados obtidos para $\omega_c = 300 \text{ rad/s}$.

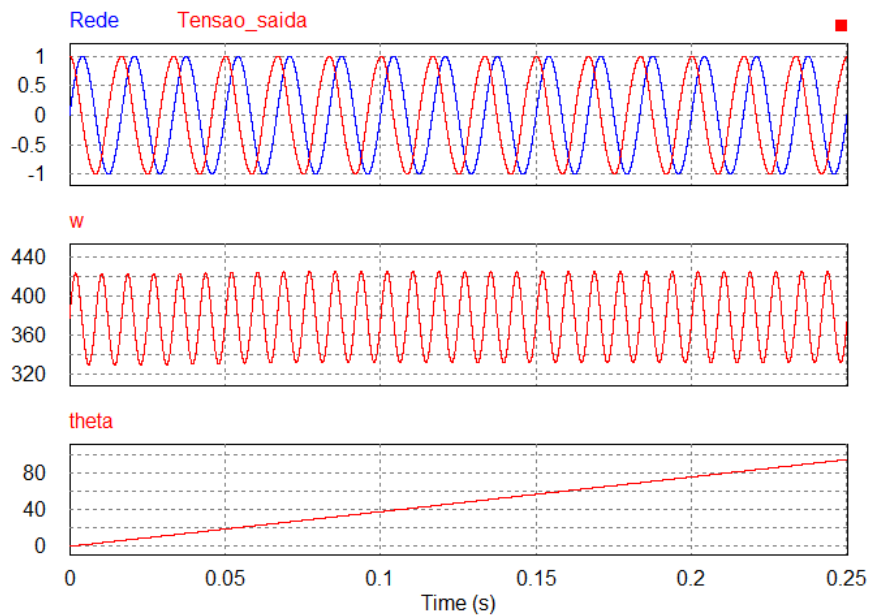


Figura 26 – Resultados obtidos para $\omega_c = 377 \text{ rad/s}$.

É possível perceber que a velocidade de convergência está diretamente ligado à pela proximidade do valor de ω_c com a frequência do sinal de entrada.

A faixa de passagem do sistema é diretamente afetada pelos ganhos do PI. Por exemplo, quanto menor for o valor de k_p menor será a oscilação de ω em torno do valor da

frequência, isto ocorre pois a filtragem realizada pelo controlador PI se torna mais seletiva.

A Figura 27 mostra os resultados para $k_p = 1$.

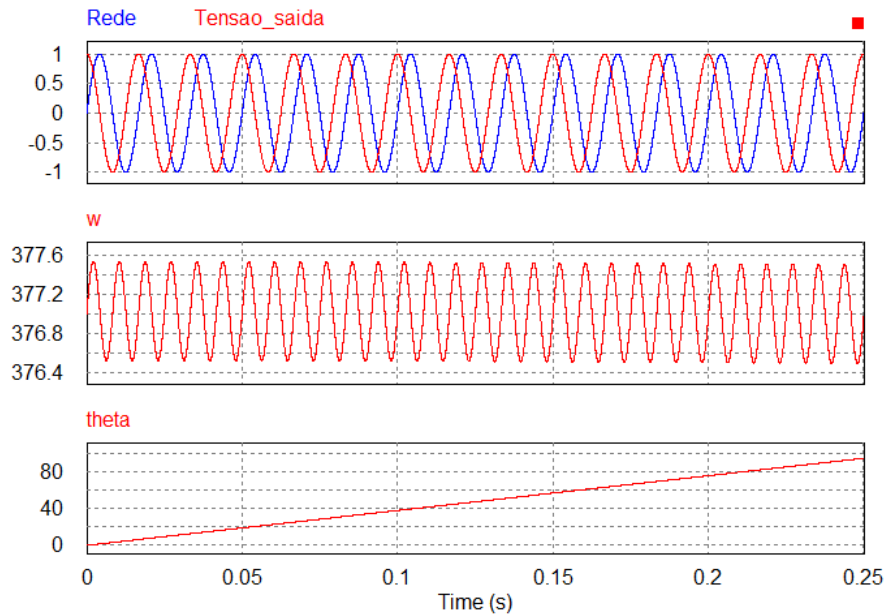


Figura 27 – Resultados obtidos para $k_p = 1$ e $\omega_c = 377 \text{ rad/s}$.

A variação de ω em torno de 377 rad/s na Figura 27 é bem inferior a variação de ω na Figura 26.

4.2.2 Monofásicos com presença de harmônicos

Na presença de harmônicos na tensão o circuito de sincronismo utilizado anteriormente não apresenta resultados satisfatório. Desta forma, é necessário a utilização de um sistema de filtragem antes do PLL. Neste trabalho, esta filtragem é feita pelo SOGI. O circuito SFR-PLL será aplicado juntamente com o SOGI a uma fonte de tensão com as componentes de terceiro e quinto harmônico.

A fonte de tensão tem a seguinte forma:

$$v = \text{sen}(\omega t) + 0.12 \text{sen}(3\omega t) + 0.06 \text{sen}(5\omega t)$$

Os parâmetros de projeto do controlador PI utilizado na seção anterior serão os mesmos.

A Figura 28 mostra a implementação desta técnica no ambiente PSIM.

A Figura 29 mostra o mesmo circuito apresentado pela Figura 28 em estrutura digital

Uma variação do ganho K permite uma melhor filtragem do sinal v , os resultados serão apresentados para $K = 0.5$, $K = \sqrt{2}$ e $K = 3$.

É possível observar que o sistema apresenta uma sensibilidade com a variação do

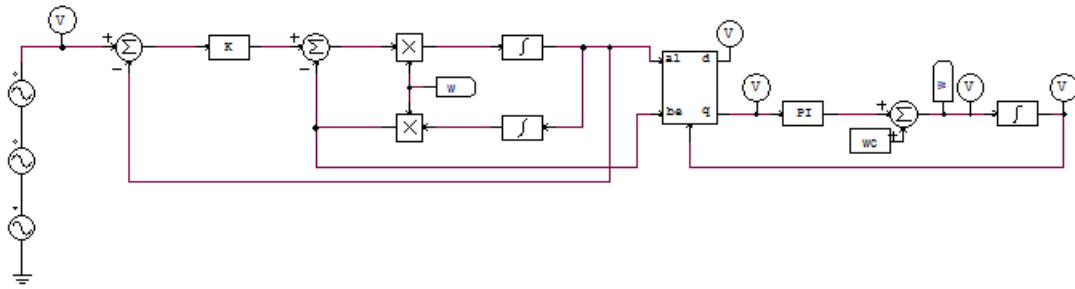


Figura 28 – Filtragem de Sinal através do SOGI.

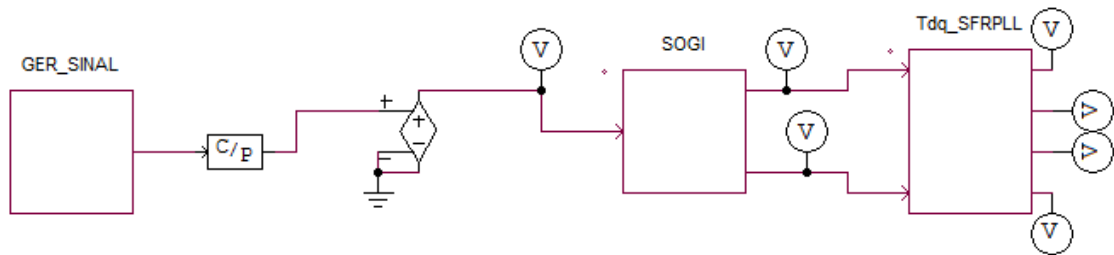


Figura 29 – Estrutura digital do circuito da Figura 28.

valor de k , quanto menor for, o circuito SOGI realizará uma melhor filtragem do sinal.

As Figuras 30, 31 e 32 mostram os resultados obtidos da implementação do circuito apresentado com $K = 0.5$, $K = \sqrt{2}$ e $K = 3$ respectivamente.

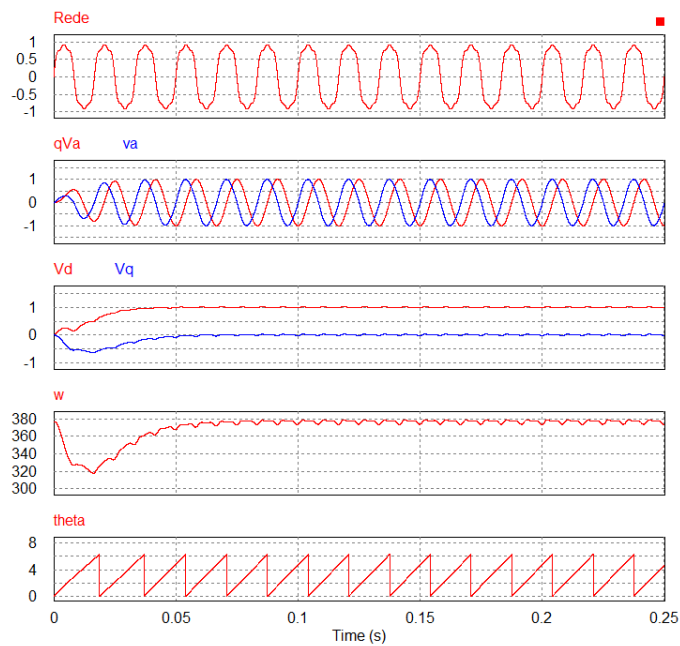


Figura 30 – Resultados obtidos para $K = 0.5$.

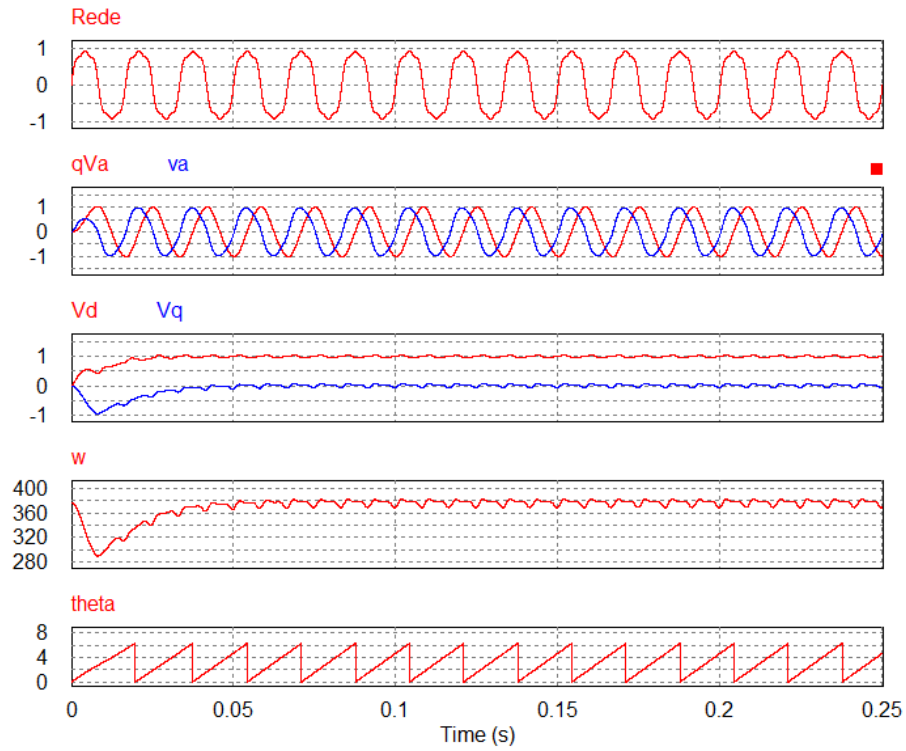


Figura 31 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$.

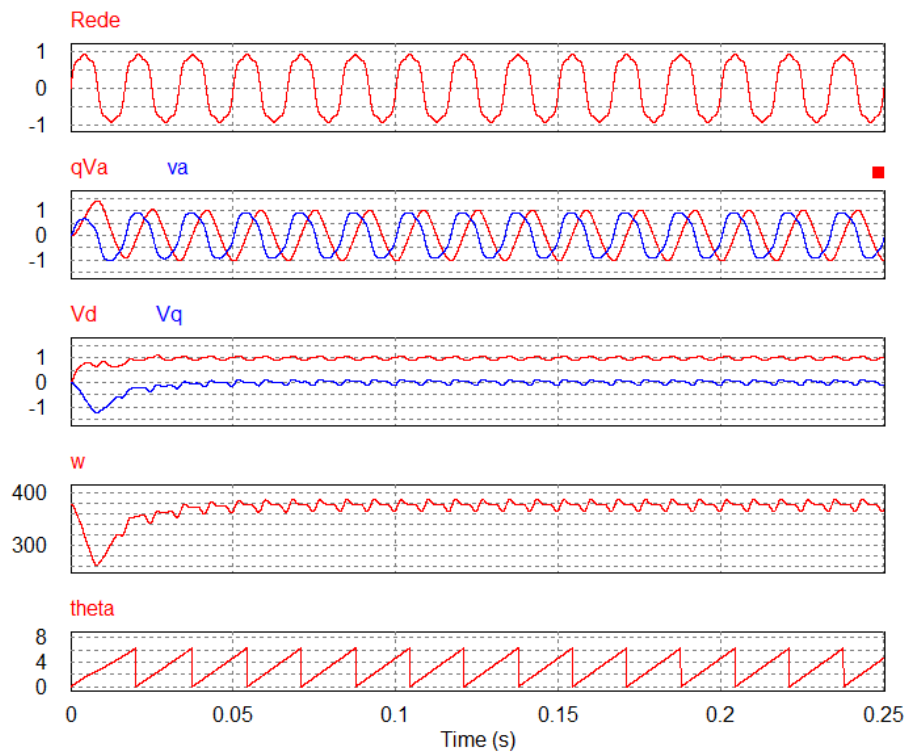


Figura 32 – Resultados obtidos para $K = 3$.

4.3 Sistemas trifásicos

4.3.1 Sistemas trifásicos sem presença de harmônicos

O circuito SRF-PLL será aplicado a uma fonte de tensão trifásica equilibrada da seguinte forma:

$$v_a = \text{sen}(\omega t)$$

$$v_b = \text{sen}(\omega t - 2\pi/3)$$

$$v_c = \text{sen}(\omega t + 2\pi/3)$$

Os parâmetros do controlador PI seguem sendo os mesmos calculados na seção 4.2.1.

A Figura 33 mostra a implementação no PSIM.

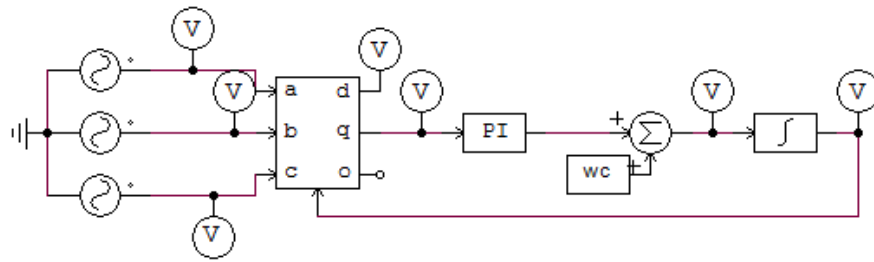


Figura 33 – Detecção de ângulo de operação de rede trifásica.

A Figura 34 mostra o mesmo circuito apresentado pela Figura 33 em estrutura digital

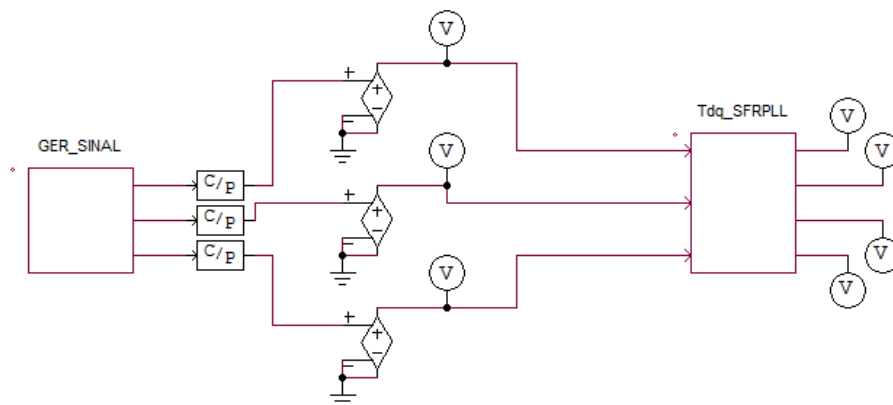


Figura 34 – Estrutura digital do circuito da Figura 33.

A Figura 35 mostra os resultados obtidos.

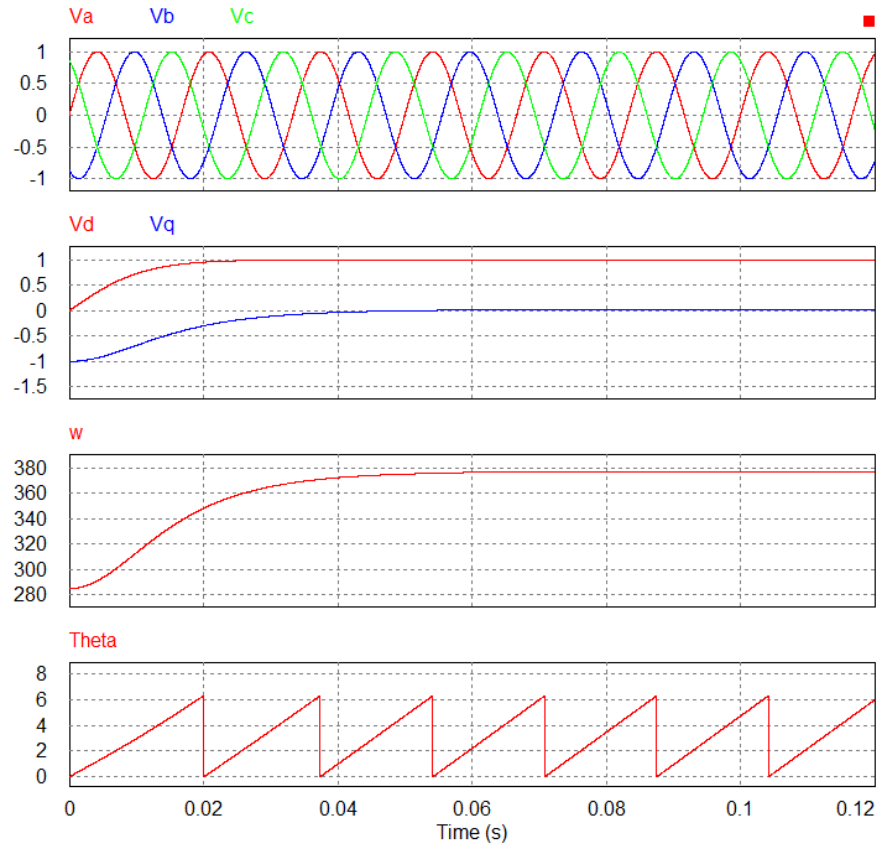


Figura 35 – Resultados obtidos para implementação do SRF-PLL em rede trifásica equilibrada.

4.3.2 Sistemas trifásicos com presença de harmônicos

O circuito DSOGI-PLL será aplicado em uma fonte de tensão equilibrada com presença de quinto harmônico.

A fonte de tensão é da seguinte forma:

$$v_a = \text{sen}(\omega t) + 0.12 \text{sen}(3\omega t) + 0.06 \text{sen}(5\omega t)$$

$$v_b = \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) + 0.12 \text{sen}(3\omega t) + 0.06 \text{sen}(5\omega t + 2\pi/3)$$

$$v_c = \text{sen}(\omega t + 2\pi/3) + 0.12 \text{sen}(3\omega t) + 0.06 \text{sen}(5\omega t - 2\pi/3)$$

A Figura 36 mostra a implementação no PSIM.

A Figura 37 mostra o mesmo circuito apresentado pela Figura 36 em estrutura digital

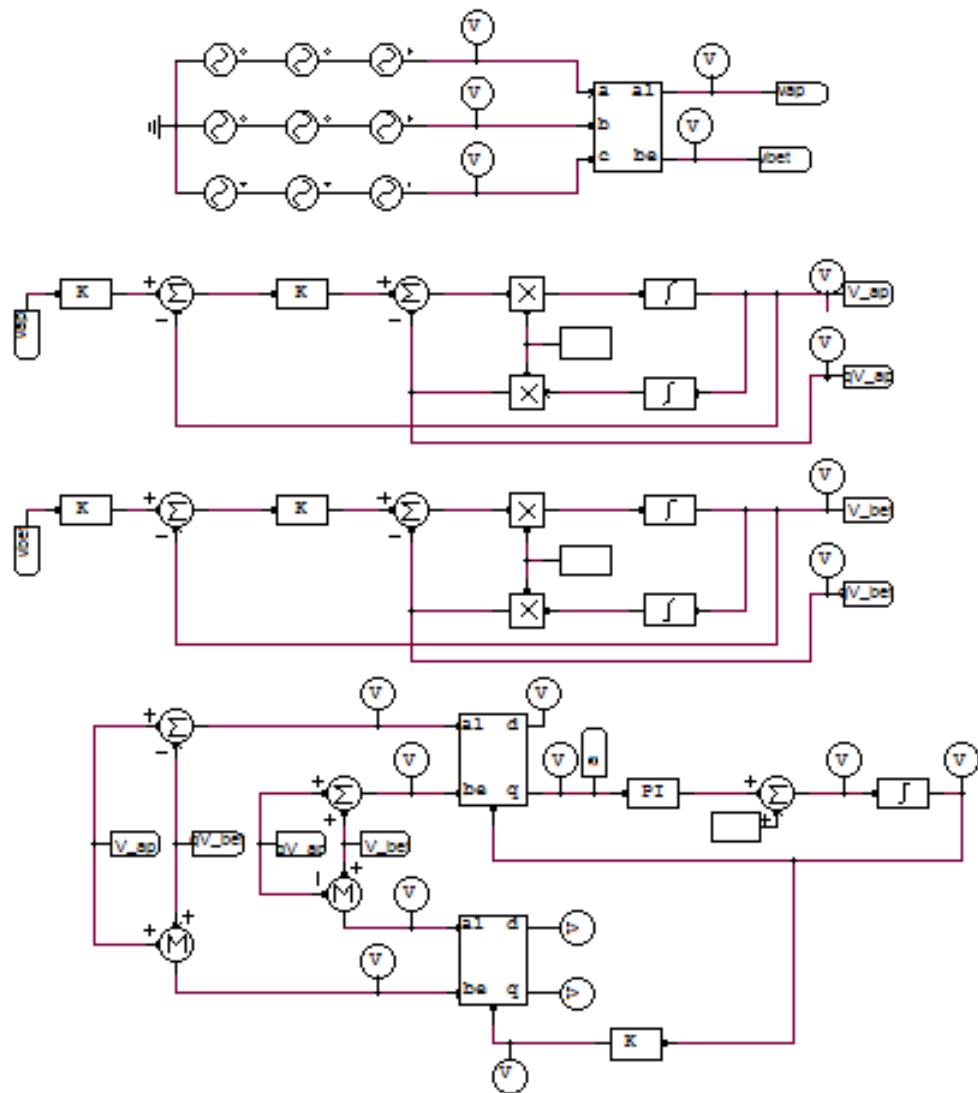


Figura 36 – Detecção de ângulo de operação de rede trifásica com harmônicos.

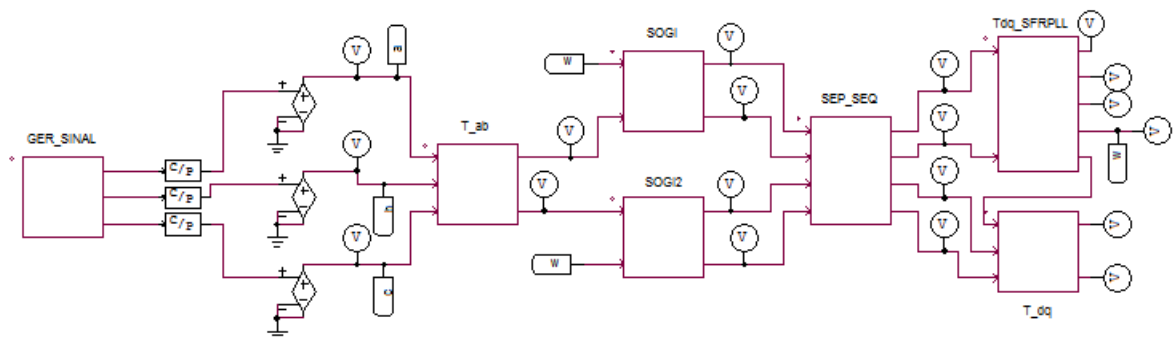


Figura 37 – Estrutura digital da Figura 36.

As Figuras 38, 39 e 40 mostram os resultados obtidos da implementação do circuito apresentado com $K = 0.5$, $K = \sqrt{2}$ e $K = 3$ respectivamente.

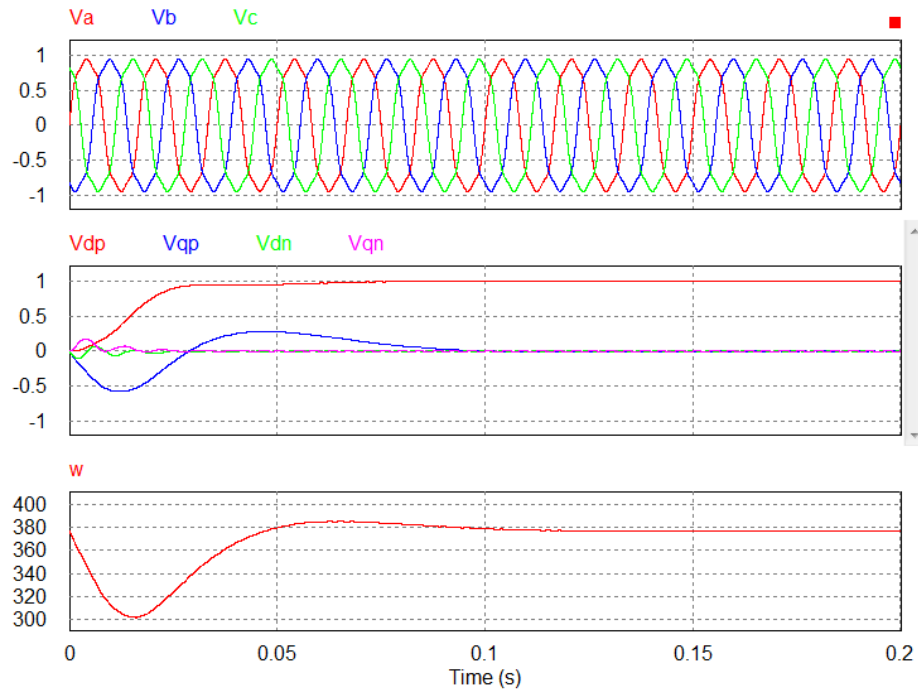


Figura 38 – Resultados obtidos para $K = 0.5$.

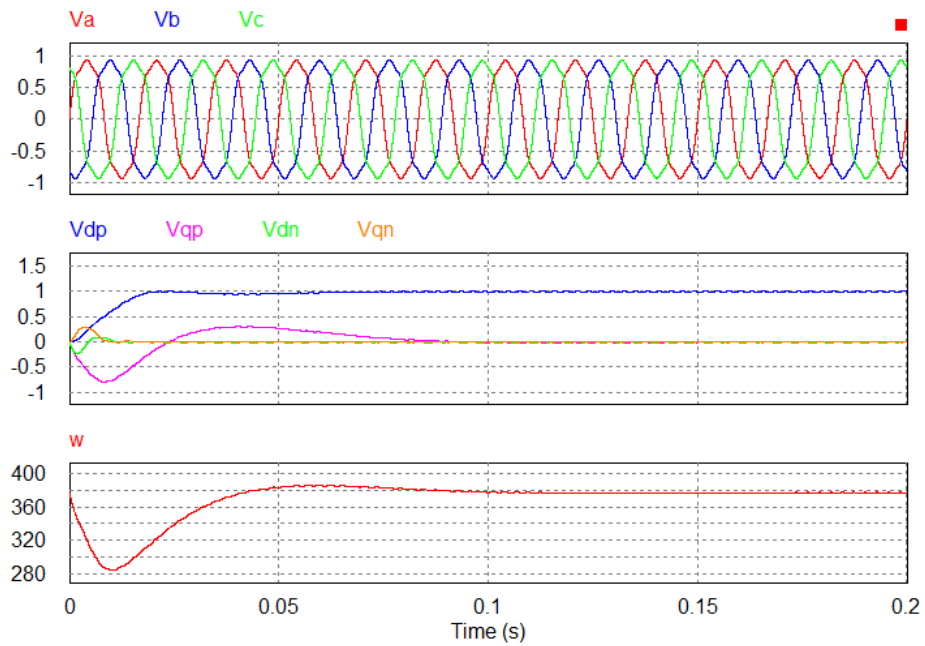


Figura 39 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$.

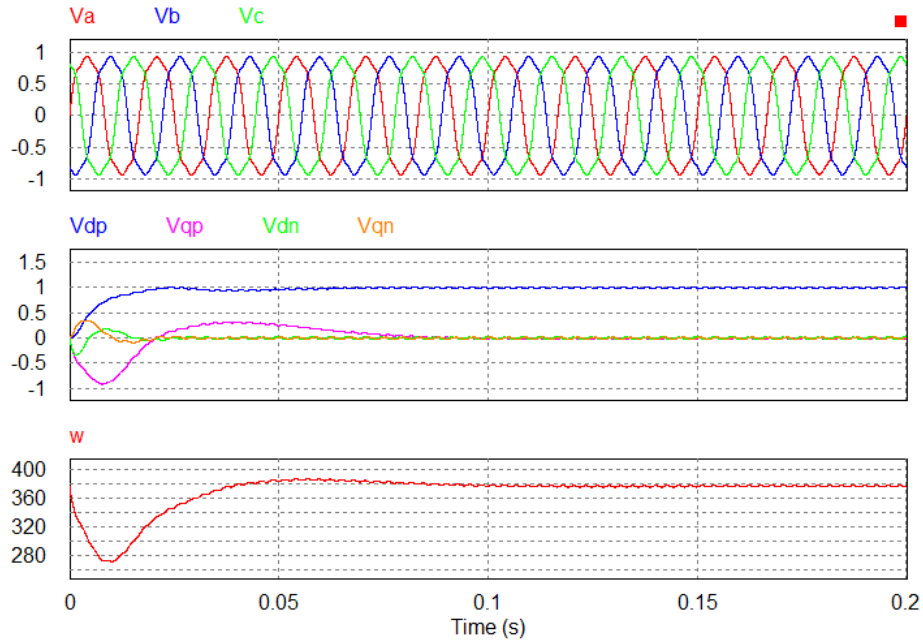


Figura 40 – Resultados obtidos para $K = 3$.

É possível verificar que a qualidade da filtragem possui sensibilidade com a variação de k , quando menor o valor de k melhor a qualidade da filtragem.

É possível verificar também que o DSOGI-PLL executa a separação do sinal em componentes de sequência e rastreia a frequência de operação da rede da componente fundamental de sequência positiva. As componentes de sequência negativa são nulas devido ao fato do sinal não possuir desequilíbrio entre fases.

4.3.3 Sistemas trifásicos desbalanceados com presença de harmônicos

O circuito DSOGI-PLL também é utilizado para esta situação. A fonte de tensão é da seguinte forma:

$$v_a = \text{sen}(\omega t) + 0.12 \text{sen}(3\omega t) + 0.06 \text{sen}(5\omega t)$$

$$v_b = 0.8 \text{sen}(\omega t - 2\pi/3) + 0.096 \text{sen}(3\omega t) + 0.048 \text{sen}(5\omega t + 2\pi/3)$$

$$v_c = 1.2 \text{sen}(\omega t + 2\pi/3) + 0.144 \text{sen}(3\omega t) + 0.072 \text{sen}(5\omega t - 2\pi/3)$$

As Figuras 41, 42 e 43 mostram os resultados obtidos da implementação do circuito apresentado com $K = 0.5$, $K = \sqrt{2}$ e $K = 3$ respectivamente.

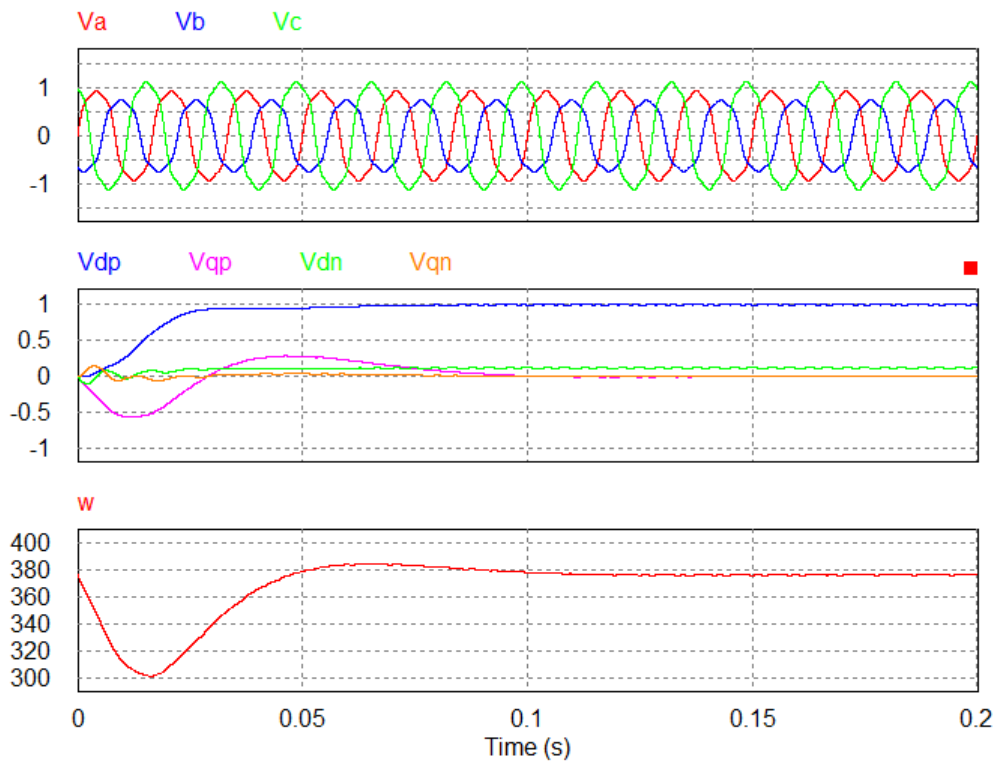


Figura 41 – Resultados obtidos para $K = 0.5$.

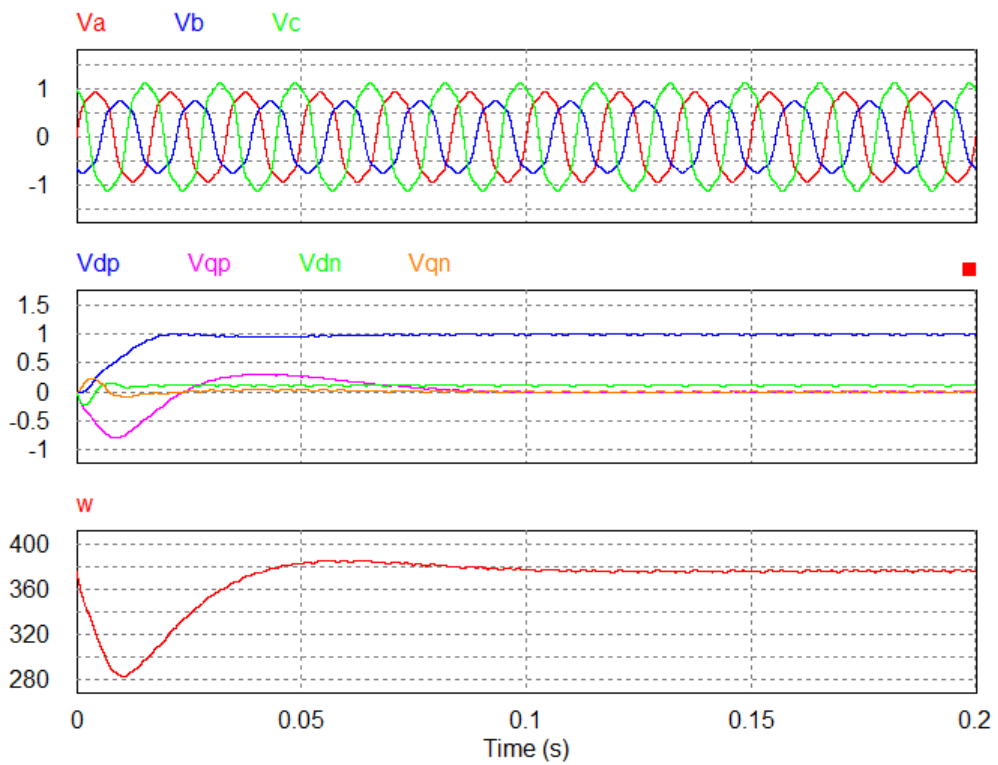


Figura 42 – Resultados obtidos para $K = \sqrt{2}$.

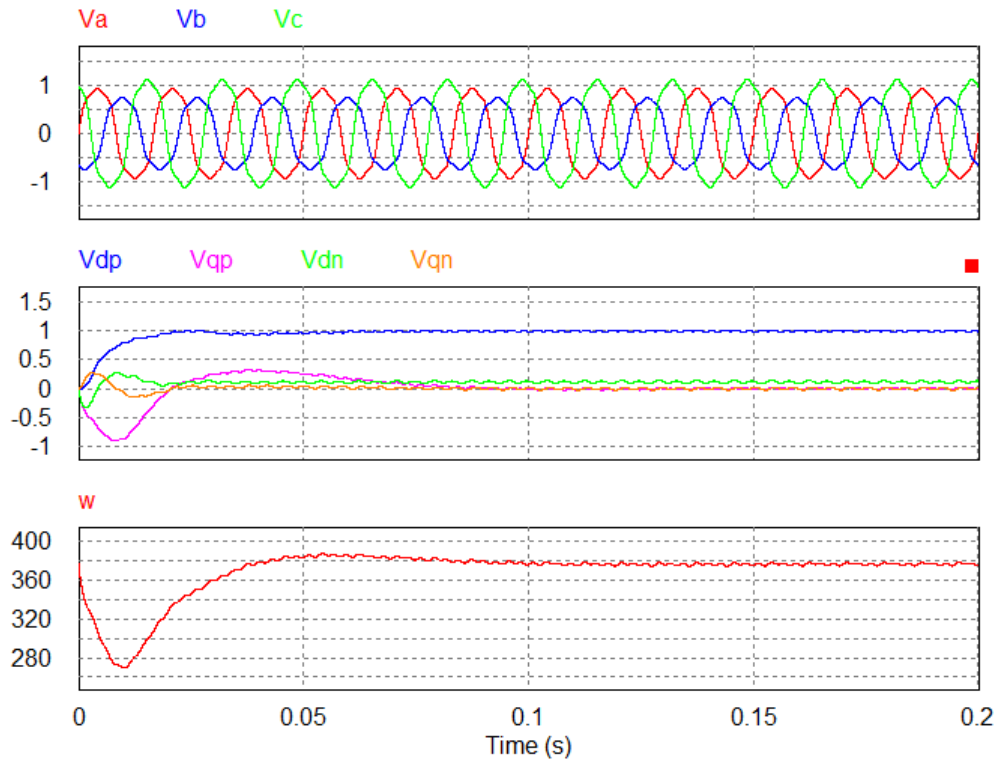


Figura 43 – Resultados obtidos para $K = 3$.

Como visto anteriormente o valor de k influencia na qualidade da filtragem. Existe um valor de componente de sequência negativa devido a ocorrência de desbalanço entre fases, a quantidade de componente de sequência negativa é dado pelo valor de V_{dn} que é igual a $0.117 pu$.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações gerais

Devido as grandes dificuldades encontradas para se implantar unidades geradoras de grande porte, gerações de pequenos portes e mais próximos de centros consumidores têm ganhado bastante espaço, dentre eles o conceito de GD merece destaque. Juntamente com o conceito de GD, gerações baseadas em fontes renováveis se tornam essenciais, dentre elas, geração eólica e fotovoltaica possuem particularidades na operação em paralelo com a rede elétrica devido a grande intermitência de geração associada a estes casos.

O presente trabalho abordou o estudo de técnicas de sincronismo angular de sistemas para sistemas de energia renováveis com a rede elétrica monofásica e trifásica. O circuito sincronizador PLL utilizado é baseado no integrador generalizado de segunda ordem (SOGI).

O circuito DSOGI-PLL apresenta alta qualidade na filtragem de sinais e grande robustez na detecção do ângulo de sequência positiva da componente fundamental de um determinado sinal trifásico quando o mesmo está submetido a desequilíbrio entre fases e presença de harmônicos.

O software PSIM foi utilizado para a simulação dos circuitos de sincronismo com rede elétrica monofásica e trifásica equilibrada, equilibrada com presença de harmônicos e, para o caso de rede trifásica, desequilíbrio entre fases.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Os sistemas estudados no presente trabalho são considerados lineares e invariantes no tempo, visando uma ampliação de conhecimento dos conceitos elaborados algumas sugestões podem ser abordadas, como:

- Considerações para sistemas adaptativos em frequência;
- Efeitos transitórios da rede elétrica;
- Efeitos de curto circuito;
- Efeitos de corte de carga.

REFERÊNCIAS

- [1] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. Geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil. Disponível em: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard>. Acessado em 02/11/2016.
- [2] ALMEIDA, P. M. d. *Modelagem e Controle de Conversores Fonte de Tensão Utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição*. 2011. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. O efeito fotovoltaico e a primeira célula. Disponível em: <http://gsfotovoltaico.com.br>. Acessado em 03/11/2016.
- [4] FOTOVOLTEC SISTEMAS FOTOVOLTAICOS. Tecnologia. disponível em: <http://www.fotovoltec.com.br/front/tecnologia>. Acessado em 03/11/2016.
- [5] EXAME.COM. Energia solar deve crescer 6 vezes no mundo. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/energia-solar-deve-crescer-6-vezes-no-mundo/>. Acessado em 03/11/2016.
- [6] IZIDORO, B. C.; ORSI, G. C.; CORDEIRO, L. R. Estudos do Panorama Nacional para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Após a Resolução 482/2012 da ANEEL. 2014. 174 f. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [7] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano decenal de expansão de energia 2024. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/pdee/forms/epeestudo.aspx>. Acessado em 03/11/2014.
- [8] MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento de energia eólica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*. São José dos Campos, v.30, n.1, p. 1304-1 - 1304-13, ago./set. 2007.
- [9] JAIN, P. *Wind Energy Engineering*. New York: MacGraw-Hill, 2011. 330 p.
- [10] AEROGERADORES.ORG. Tudo sobre aerogeradores e energia eólica. Disponível em: <http://www.aerogeradores.org/limitedebetz.php>. Acessado em 07/11/2016.
- [11] ENERGY HUNTERS. Consulenze e misure per energie rinnovabili. Disponível em: <http://www.energyhunters.it/content/turbine-eoliche-ad-asce-orizzontale-o-verticale-un-confronto>. Acessado em 07/11/2016.
- [12] CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Energia Eólica Panorama Mundial e Perspectiva no Brasil. 2009. 38 f. Brasília, 2009.
- [13] ENERGIA EÓLICA. Energia Eólica no Mundo. disponível em: <https://evolucaoenergiaeolica.wordpress.com/energia-eolica-no-mundo/>. Acessado em: 04/11/2016.
- [14] CRNB-BIO. Eólica poderá responder a 20% da geração no mundo até 2030. disponível em: <http://crnbio.com.br/eolica-podera-responder-por-20-da-geracao-no-mundo-ate-2030/>. Acessado em: 04/11/2016.

- [15] SCIELO BRASIL. Fonte eólica de energia: aspectos de inserção, tecnologia e competitividade. disponível em: <http://www.scielo.br/>. Acessado em: 04/11/2016.
- [16] GEAGRAFIA OPINATIVA. Como funcionam as usinas hidrelétricas, termelétricas e nucleares. disponível em: <http://www.geografiaopinativa.com.br/2013/08/como-funciona-as-usinas-hidreletricas.html>. Acessado em: 24/11/2016.
- [17] TEODORESCO R., LISERRE M., RODRÍGUEZ P. *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. United Kingdom John Wiley & Sons, Ltd, 2011. 384 p.
- [18] CAMPOS, C. M. M. *PLL PHASE LOCKET LOOP*. 2007. 12 p. Relatório de Projeto - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.
- [19] SEIXAS, P. F. *PHASE LOCKET LOOP - PLL*. Notas de aula - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: http://www.cpdee.ufmg.br/paulos/sei_arquivos/Aula_02_Phase_Locked_Loops.pdf. Acessado em: 28/11/2016.
- [20] CORTIZO, P. C. Filtros Ativos de Potência. Notas de Aula - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: www.cpdee.ufmg.br/porfirio/.../Transformacoes.ppt. Acessado em 29/11/2016.
- [21] PEREZ, M. A. Transformada de Clarck ($\alpha\beta$). Página pessoal. disponível em: <http://profesores.elo.utfsm.cl/mpl/index.php/2016/04/25/transformada-de-clarke-alfa-beta/>. Acessado em 28/11/2016.
- [22] LOPES, A. G. P. d. S. *Controlo Avançado de Conversores para ligação à rede*. 2013. 41 f. Preparação da Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores Maior Automação) - Faculdade d Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2013.
- [23] FRANKLIN G. F., POWELL J. D., NAEINI A. E. *Sistemas de controle para a engenharia*. Traduzido por SOUZA F. d. O. Porto Alegre Bookman, 2011. 702 p.